

Alexandra Maria Magalhães Carvalho

**Hidrogeologia ambiental da região do Parque
Natural da Serra da Estrela
(setor de Seia-Torre-Covilhã):
uma abordagem multidisciplinar**

**Tese submetida à Universidade do Porto e à Universidade de Aveiro para obtenção do grau
de Doutor em Geociências**



Departamento de Geociências, Ambiente e
Ordenamento do Território

Faculdade de Ciências da Universidade do
Porto



universidade de aveiro

Departamento de Geociências

Universidade de Aveiro

*“A Serra da Estrela é uma personalidade. Descobre-se à distância de trinta léguas.
Caminha-se para ela e fica sempre a mesma, altiva, remota, coberta com manto real.”*

Aquilino Ribeiro

in “O Homem da Nave: serranos, caçadores e fauna vária”

Aos meus Pais e irmã

Agradecimentos

Para a realização desta dissertação contei com a colaboração direta e indireta de diversas pessoas e instituições, às quais estou profundamente grata e sem as quais, não teria sido possível a sua concretização, a todas elas, o meu mais sincero agradecimento.

Pela amizade, incentivo, permanente apoio e orientação ao Prof. Doutor Jorge Espinha Marques (Faculdade de Ciências da Universidade do Porto), mentor do estudo, meu orientador científico, quero expressar o meu profundo agradecimento para que este trabalho chegasse a bom porto tendo sido, sem dúvida, a pessoa que mais me ajudou na sua concretização.

À Doutora Paula Carreira (Instituto Tecnológico e Nuclear, atualmente Campus Tecnológico e Nuclear (IST-CTN)), minha coorientadora, obrigada pelo rigor e disponibilidade demonstrada durante todo o processo de preparação e concretização deste trabalho e pela forma amável com que sempre me tratou.

Ao Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (DGAOT-FCUP), na pessoa do Prof. Doutor Fernando Noronha, Diretor do Programa Doutoral em Geociências, da Prof.^a Doutora Isabel Fernandes, membro da Comissão Científica, e da Prof.^a Doutora Deolinda Flores, Presidente do DGAOT, pelo acompanhamento da minha situação académica e pela disponibilização de recursos utilizados nos trabalhos de investigação.

Agradeço ao Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro (DGUA), na pessoa do Prof. Doutor Fernando Rocha, Diretor do DGUA, da Prof.^a Doutora

Cristina Bernardes e do Prof. Doutor José Francisco dos Santos, membros da Comissão Científica, por todo o apoio prestado.

Ao Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, por todo o apoio concedido à realização dos trabalhos de campo no Parque Natural da Serra da Estrela, em particular, ao Eng. António Coimbra, à Arq. Maria da Paz, ao Dr. Armando Carvalho, ao Dr. João Alves e ao Dr. Rui Melo.

Aos Vigilantes da Natureza do Parque Natural da Serra da Estrela, em especial, ao Sr. Marco Saraiva e ao Sr. Joaquim Neves, pelo apoio prestado durante a realização dos trabalhos de campo do inventário hidrogeológico.

O meu muito obrigada à Dr.^a Dina Nunes e D. Manuela Correia (IST-CTN) pelo processamento analítico das amostras ao nível dos isótopos estáveis e radioativos, e a todos os demais colaboradores do Laboratório de Isótopos Ambientais do Campus Tecnológico e Nuclear do IST pela prestabilidade e simpatia com que me receberam.

Ao Prof. Doutor Rui Moura, do DGAOT-FCUP, por todo o apoio prestado na realização do estudo hidrogeofísico, nomeadamente, durante a realização dos trabalhos de campo e na interpretação dos resultados.

À Doutora Catarina Mansilha do Departamento de Saúde Ambiental – Unidade de Água e Solo, do Laboratório de Química e Toxicologia do Instituto Nacional de Saúde Doutor Ricardo Jorge, no Porto, agradeço a disponibilidade e colaboração na análise dos resultados relativos aos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos.

Muito obrigada a todos aqueles que em ambas as instituições envolvidas no Programa Doutoral em Geociências (Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e Universidade de Aveiro) contribuíram de forma direta ou indireta para a minha formação académica e para a concretização deste trabalho.

Aos colegas da FCUP António Pereira, Cláudio Paulo, David Cunha, Joana Almeida, Joana Araújo, José Miguel Antunes, Nuno Santos, e Olavo Sousa, que prestaram auxílio à realização de tarefas de campo, agradeço o empenho, a boa disposição e o companheirismo.

Às minhas amigas da Cientuna (Ana Reis, Ana Sofia, Filipa Pinheiro, Joana Castro, Susana João,...), agradeço todo o apoio, companheirismo e boa disposição essenciais para manter a força para encarar esta árdua tarefa. Agradeço em particular à Delfina Barros (Milú) e Maria Manuel Aranha (Miqué).

Obrigado aos meus amigos, em especial ao Vasco Mano, António Cambeiro e família, e aos meus colegas, por toda a ajuda, o carinho e palavras de incentivo ao longo desta difícil tarefa.

À minha família, principalmente aos meus pais e à minha irmã, quero deixar bem expressa a imensa gratidão pela forma como sempre me apoiaram e ajudaram proporcionando-me tudo que lhes foi possível e incentivando-me a concluir com sucesso mais esta etapa da minha vida.

A todos os que colaboraram na realização deste trabalho, a quem por lapso não dei o devido destaque, expresso o meu pedido de desculpas e os meus sinceros agradecimentos.

Financiamento

Os recursos financeiros utilizados para a realização deste trabalho tiveram as seguintes origens:

- i) Projeto PEst-OE/CTE/UI0039/2011/2012 (Centro de Geologia da Universidade do Porto e Fundação para a Ciência e a Tecnologia).
- ii) Protocolo de prestação de serviços celebrado entre a Associação para o Desenvolvimento da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e a Câmara Municipal de Aguiar da Beira.

Palavras-Chave

Água Subterrânea, Regiões Montanhosas, Hidrogeoquímica Ambiental, Hidrologia Isotópica, Contaminação de Aquíferos.

Resumo

Incluído no maciço montanhoso da Serra da Estrela, localizada na Cordilheira Centro-Ibérica, o sector de Seia-Torre-Covilhã (SSTC) foi alvo de um estudo cujo objetivo principal era aprofundar o conhecimento acerca da hidrogeologia ambiental nesta região. Complementarmente, pretendia-se contribuir para um melhor ordenamento territorial assim como para uma gestão sustentável dos recursos hídricos.

Os trabalhos de investigação foram conduzidos segundo uma orientação multi e interdisciplinar contando com metodologias e técnicas com origem em diversos ramos das Geociências, tais como: a Geologia, a Geomorfologia, a Climatologia, a Hidrogeologia, a Hidrogeoquímica, a Hidrologia Isotópica e a Geofísica. O estudo contou com tarefas de campo, de laboratório e de gabinete.

O sector de estudo é essencialmente constituído por rochas graníticas de idade varisca, por pequenas massas de rochas metassedimentares do complexo Xisto-Grauváquico do Precâmbrico-Câmbrico, e por depósitos glaciários, fluvioglaciários e aluvionares do Plistocénico Superior e do Holocénico. A principal estrutura tectónica, à escala local, é a megaestrutura regional designada por Falha de Bragança – Vilariça – Manteigas, de direção NNE-SSW. O SSTC, de orientação NW-SE, abrange as vertentes oriental e ocidental do maciço montanhoso e apresenta uma altitude que varia entre 1993 m, na Torre, e 565 m, em Seia. As características climatológicas da região, como a distribuição espacial da precipitação e da temperatura média do ar, são condicionadas pela sua geomorfologia.

No SSTC foram estabelecidas as seguintes unidades hidrogeológicas: depósitos de cobertura, rochas metassedimentares e rochas graníticas. Dada a natureza das litologias que o constituem, a circulação hídrica subterrânea do SSTC faz-se, preferencialmente, por meios fissurados e, em menor medida, em meios porosos. O inventário hidrogeológico do SSTC permitiu definir uma rede de monitorização de pontos de água com base na qual se desenvolveram os estudos subsequentes.

O estudo hidrogeoquímico da região permitiu validar que as águas subterrâneas locais são hipotermais, hipossalinas e com pH entre 5,06 e 6,60. Verificou-se a predominância da *facies* hidrogeoquímica cloretada-sódica, tendo-se também registado águas com *facies* hidrogeoquímicas bicarbonatada-sódica e cloretada-cálcica. Estimou-se que a área de recarga dos pontos de água estudados seja próxima dos seus locais de emergência, traduzindo-se num tempo de residência relativamente pequeno e reduzida interação água-rocha. Foram determinadas fortes correlações entre a condutividade elétrica da água e os componentes iónicos maioritários (sódio, cálcio e cloreto), tendo-se verificado também a existência de uma forte correlação entre as concentrações dos iões sódio e cloreto, o que sugere uma entrada conjunta das duas espécies químicas no sistema hidrogeológico.

Através do estudo dos isótopos naturais (oxigénio-18 e deutério), determinou-se a reta das águas meteóricas locais com a equação $\delta^2\text{H}=7,44\delta^{18}\text{O}+7,44$. Verificou-se que, entre nascentes localizadas na vertente oriental e ocidental, a altitudes próximas, existem diferenças significativas nos teores de ^{18}O e ^2H . A heterogeneidade de teores de trítio determinados nas amostras de água subterrânea do sector, caracterizam sistemas com período de circulação rápido, superficial e com tempos de residência reduzido.

O estudo da contaminação das águas subterrâneas do setor teve como intuito principal avaliar alterações hidrogeoquímicas de origem antrópica, como sendo as resultantes de: operações de limpeza de neve das estradas, infiltração das águas de escorrência das estradas e fogos florestais. Utilizaram-se técnicas geofísicas de resistividade elétrica para se determinar a existência de plumas de contaminação originadas pela limpeza de neve nas estradas. Determinaram-se os teores de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos de alguns pontos de água subterrânea, tendo-se verificado que os teores destes compostos são mais elevados em águas cuja infiltração ocorreu em áreas afetadas por fogos florestais.

Keywords

Groundwater, Mountain Regions, Environmental Hydrogeochemistry, Isotope Hydrology, Aquifer Contamination.

Abstract

Included on the massif of Serra da Estrela, located on Cordilheira Centro-Iberica, the Seia-Torre-Covilhã sector was target of a study whose main objective was to deepen the knowledge about environmental hydrogeology in the region. Additionally, it was intended to contribute to a better territorial planning and a sustainable management of the water resources.

The investigation works were conducted in a multi and interdisciplinary way by using methodologies and techniques originated in diverse areas of Geosciences, such as: Geology, Geomorphology, Climatology, Hydrogeology, Isotopic Hydrology and Geophysics. The study included field, laboratory and cabinet tasks.

The study sector is essentially consisted by granitic rocks from varisco, little masses of metasedimentary rocks of Complexo Xisto-Grauváquico of Precâmbrico-Câmbrico, and by glacial, fluvioglacial and aluvionar deposits from Plistocénico Superior and Holocénico. The main tectonic structure, in local scale, is the regional megastructure Falha de Bragança – Vilarica – Manteigas, with the direction NNE-SSW. The SSTC, with NW-SE orientation, covers the eastern and western slopes of the massif and presents a height between 1993 m, in Torre, and 565 m, in Seia. The region's climatologic characteristics, such as special precipitation distribution and average air temperature, are restricted by its geomorphology.

In SSTC were established the following hydrogeological unities: coverage deposits, metasedimentary rocks and granitic rocks. Because of its lithologies nature, the underground hydric circulation of SSTC is preferably made by fissured means and, to a lesser extent, in porous means. The hydrogeologic inventory of SSTC allowed to define a monitoring network of water points based on which the subsequent studies were developed.

The hydrogeochemical study of the region allowed to validate that local groundwater are hypothermal, hyposaline and with a pH between 5,06 and 6,60. Verified the predominance of hydrogeochemical *facies* cloretada-sódica, it is also registered water with hydrogeochemical *facies* bicarbonatada-sódica and cloretada-sódica. It was estimated that the recharged area of studied water points were close to their emergency locations, which translates in a relative short residence time and in a reduced water-rock interaction. Strong correlations were determined between water electrical conductivity and major ionic components (sodium, calcium and chloride), and it was also verified the existence of a strong correlation between ions sodium and chloride concentration, which suggests one joint entry of the two chemical species in the hydrogeological system.

Through the study of natural isotopes (oxygen-18 and deuterium), it was determined the local meteoric water line with the equation $\delta^2\text{H}=7,44\delta^{18}\text{O}+7,44$. It was verified that, between springs located in eastern and western slopes, at approximated highs, there were significant differences in ^{18}O and ^2H levels. The heterogeneity of tritium levels determined in groundwater samples of the sector, characterize systems with quick, superficial and with reduced residence circulation periods.

The groundwater contamination study of the sector had has a main intention to evaluate anthropic hydrogeochemicals changes, as result of: road ice cleaning operations, water runoff from roads infiltration and wildfires. Geophysical electric

resistivity techniques were used to determine the existence of contamination plumes originated by road ice cleaning. Also determined were the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons of some groundwater points, being verified that the level of this compounds were higher in water whose infiltration occurred in wildfires affected areas.

Índice Geral

1. Introdução, 1

1.1. Objetivos, 3

1.2. Localização geográfica, 4

1.3. Estrutura da Investigação, 6

1.4. Estudos anteriores, 7

1.4.1. Geologia e Geomorfologia, 7

1.4.2. Climatologia, 10

1.4.3. Hidrologia e Hidrogeologia, 13

2. Métodos e técnicas, 17

2.1. Caraterização geológica, geomorfológica e climatológica, 18

2.2. Caraterização hidrogeológica, 19

2.2.1. Inventário hidrogeológico, 19

2.2.2. Hidrogeoquímica, 20

2.2.3. Hidrologia isotópica, 24

2.2.4. Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), 31

2.2.5. Hidrogeofísica, 32

2.3. Nota sobre os conceitos de Contaminação e de Poluição, 36

3. Enquadramento geológico, geomorfológico e climatológico, 39

3.1. Geologia, 40

3.1.1. Enquadramento geológico regional, 40

3.1.2. Enquadramento geológico local, 45

3.2. Geomorfologia, 56

3.2.1. Enquadramento geomorfológico regional, 56

3.2.2. Enquadramento geomorfológico local, 62

3.3. Climatologia, 66

3.3.1. Enquadramento climatológico regional, 66

3.3.2. Enquadramento climatológico local, 74

4. Enquadramento hidrogeológico, 81

4.1. Introdução, 81

4.2. Hidrogeologia regional, 82

4.3. Inventário hidrogeológico, 90

5. Hidrogeoquímica, 95

5.1. Introdução, 95

5.1.1. Composição das águas subterrâneas, 95

5.1.2. Entrada e transporte de solutos na água, 98

5.2. Hidrogeoquímica do sector Seia – Torre – Covilhã, 104

5.2.1. Parâmetros físico-químicos, 104

5.2.2. *Facies* hidrogeoquímicas, 118

6. Hidrologia isotópica, 129

6.1. Introdução, 129

6.1.1. Isótopos estáveis e radioativos, 131

6.1.2. Notação delta (δ), 132

6.1.3. Fracionamento isotópico, 133

6.1.4. Origem meteórica da água subterrânea e variações na composição isotópica, 142

6.1.5. Aplicação do ^3H em estudos de Hidrologia Isotópica, 146

6.2. Hidrologia isotópica do sector Seia-Torre-Covilhã, 156

7. Contaminação da água subterrânea, 173

7.1. Introdução, 173

7.2. Modificações hidrogeoquímicas das águas subterrâneas por processos de contaminação, 174

7.2.1. Operações de limpeza de neve, 175

7.2.2. As águas de escorrência da estradas, 177

7.2.3. Fogos florestais, 180

7.2.4. Modificações hidrogeoquímicas das águas subterrâneas por processos de contaminação no setor de Seia-Torre-Covilhã, 183

7.3. Hidrogeofísica ambiental, 198

7.3.1. Introdução, 198

7.3.2. Hidrogeologia da Serra da Estrela, 200

7.4. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, 208

7.4.1. Introdução, 208

7.4.2. Toxicologia, 210

7.4.3. Legislação, 212

7.4.4.1. Ocorrência de HAPs como consequência de fogos florestais, 215

7.4.4.2. Ocorrência de HAPs em águas subterrâneas da Serra da Estrela, 216

8. Conclusões e perspectivas futuras, 223

Referências bibliográficas, 233

Anexos

Anexo I – Inventário hidrogeológico

**Anexo II – Valores de temperatura, pH e condutividade elétrica da água
medidos *in situ***

Anexo III – Resultados das análises hidrogeoquímicas

Índice de figuras

Capítulo 1. Introdução

Fig. 1.1. Localização do setor de Seia – Torre – Covilhã (SSTC) no contexto de Portugal continental e do Parque Natural da Serra da Estrela (PNSE).

Fig. 1.2. Cartografia geológica (na escala 1/50 000) e topográfica (na escala 1/25 000) da região do PNSE (a cartografia da área estudada encontra-se destacada a vermelho).

Fig. 1.3. Esquema representativo da estrutura da investigação.

Fig. 1.4. Mapa da glaciação da Serra da Estrela (adaptado de Daveau, 1971).

Fig. 1.5. Área abrangida pelo estudo hidrogeológico do projeto HIMOCATCH (extraído de Espinha Marques 2007).

Capítulo 2. Métodos e técnicas

Fig. 2.1. Instrumento Hanna Instruments® modelo HI 991300.

Fig. 2.2. Frasco de amostragem para análise química dos iões maiores.

Fig. 2.3. Amostragem de águas subterrâneas para determinação da composição isotópica (a); frascos de amostragem para análise de ^3H – frasco polietileno de 500 mL – e de ^2H e ^{18}O – frasco de vidro de 100 ml (b).

Fig. 2.4. (a) Frascos com amostra e zinco na linha de preparação em azoto líquido (determinação dos teores de ^2H); (b) Frascos com amostra para leitura no espectrómetro de massa (determinação dos teores de ^2H); (c) Frascos com amostra na ISOPREP para agitação (determinação dos teores de ^{18}O); (d) Destilação à pressão ambiente (determinação dos teores de ^3H); (e) Contador de cintilação líquida Packard (determinação dos teores de ^3H).

Fig. 2.5. Cromatógrafo gasoso com espectrómetro de massa acoplado, marca SHIMATZU modelo QP2010 (extraído de Shimatzu, 2013).

Fig. 2.6. Esquema representativo de um sistema de prospeção por resistividade elétrica (extraído de Kearey, *et al.*, 2002).

Fig. 2.7. Arranjo de elétrodos para levantamento de um perfil de prospeção de resistividade elétrica (adaptado de Loke, 1999).

Fig. 2.8. Equipamento de medição da resistividade elétrica da marca Iris Instruments, modelo Syscal R1 Plus.

Fig. 2.9. Configuração dos elétrodos nos dispositivos de Wenner (adaptado de Kearey *et al.*, 2002).

Fig. 2.10. Exemplo de uma pseudo-secção de uma medição de resistividade aparente (adaptado de Loke, 1999).

Capítulo 3. Enquadramento geológico, geomorfológico e climatológico

Fig. 3.1. A Serra da Estrela no contexto da Península Ibérica (fotografia de satélite de março de 2008, extraída de NASA, 2013).

Fig. 3.2. Geologia da região da Serra da Estrela (simplificado de Oliveira *et al.*, 1992).

Fig. 3.3. Principais estruturas tectónicas do Norte e Centro de Portugal (adaptado de Carvalho, 2006).

Fig. 3.4. O modelo da formação da Cordilheira Central (extraído de Ribeiro, 1988).

Fig. 3.5. Evolução geológica da Serra da Estrela (adaptado de Ferreira & Vieira, 1999).

Fig. 3.6. Mapa geológico do setor de Seia-Torre-Covilhã.

Fig. 3.7. Bloco-diagrama esquemático da geologia da Serra da Estrela (extraído de Ferreira & Vieira, 1999).

Fig. 3.8. Unidades geológica na Nave de Santo António: depósitos aluvionares (a) e depósitos glaciários e fluvioglaciários (Q).

Fig. 3.9. Granito de Seia.

Fig. 3.10. Granito do Covão do Curral.

Fig. 3.11. Granito da Covilhã.

Fig. 3.12. Granito da Estrela (note-se a ocorrência de lajeação).

Fig. 3.13. Filão de quartzo.

Fig. 3.14. Filão dolerítico do Cântaro Magro.

Fig. 3.15. Filão aplítico.

Fig. 3.16. Mapa hipsométrico de Portugal.

Fig. 3.17. Relevo da região da Serra da Estrela.

Fig. 3.18. Relevo da região da Serra da Estrela: vista de NW (em cima) e de NE (em baixo).

Fig. 3.19 - Esquema da topografia dos glaciares no Último Máximo da Glaciação. ABL – Alta Barroca das Lameiras; C – Cântaros; CM – Curral do Martins; CP – Cabeço do Picoto; LC – Lagoa Comprida; NSA – Nave de Santo António; P – Piornal; PA – Penha dos Abutres; PG – Penha do Gato; VC – Vale do Conde (adaptado de Vieira, 2004).

Fig. 3.20. Topografia do setor de Seia-Torre-Covilhã .

Fig. 3.21. Mapa de declives do setor de Seia-Torre-Covilhã .

Fig. 3.22. Perfil topográfico do setor de Seia-Torre-Covilhã.

Fig. 3.23. a. Distribuição espacial dos valores totais de precipitação, em percentagem, em relação ao período 1971-2000 para o ano de 2010 em Portugal Continental; b. Distribuição espacial dos valores totais de precipitação em Portugal Continental (mm) em relação ao período de 1971-2000 para o ano de 2010; c. Distribuição espacial dos valores totais de precipitação em Portugal Continental respeitantes à percentagem em relação ao período de 1971-2000 e ao ano 2010 (modificado de Instituto Português do Mar e da Atmosfera 2012).

Fig. 3.24. a. Distribuição espacial das diferenças da média da temperatura média diária do ar entre 2010 e o período de 1971-2000 em Portugal Continental; b. Distribuição da temperatura média diária do ar para o ano de 2010 em Portugal Continental ; c. Distribuição espacial das diferenças da média da temperatura média diária do ar entre 2010 e o período de 1971-2000 em Portugal Continental (modificado de Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2012).

Fig. 3.25. Tipos de clima de Portugal Continental segundo a classificação de Köppen-Geiger (Fonte: Instituto de Meteorologia, I. P. 2011).

Fig. 3.26. Regiões climáticas de Portugal Continental (adaptado de Daveau, 1985).

Fig. 3.27. Distribuição espacial da temperatura média do ar (extraído de Mora, 2006).

Fig. 3.28. Representação gráfica da distribuição anual da precipitação em estações meteorológicas da região da Serra da Estrela (valores normais de 1951-1980; valores extraídos de INMG, 1991).

Fig. 3.29. Representação gráfica da distribuição anual da temperatura em estações meteorológicas da região da Serra da Estrela (valores normais de 1951-1980; valores extraídos de INMG, 1991).

Capítulo 4. Enquadramento hidrogeológico

Fig. 4.1. Unidades hidrogeológicas do norte e centro de Portugal (adaptado de SNIRH, 2009).

Fig. 4.2. Bacias hidrográficas do norte e centro de Portugal Continental (adaptado de SNIRH, 2009).

Fig. 4.3. Representação do modelo hidrogeológico conceptual da Bacia do Zêzere a Montante de Manteigas (extraído de Espinha Marques, 2007).

Fig. 4.4. Mapa do inventário hidrogeológico do SSTC.

Capítulo 5. Hidrogeoquímica

Fig. 5.1. Relação entre teores de dióxido de carbono, bicarbonato e carbonato e o pH (extraído de Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013).

Fig. 5.2. Evolução temporal da temperatura da água subterrânea entre Maio de 2010 e Julho de 2012.

Fig. 5.3. Evolução temporal do pH da água subterrânea entre Maio de 2010 e Julho de 2012.

Fig. 5.4. Evolução temporal da condutividade elétrica de todos os pontos de água subterrânea entre Maio de 2010 e Julho de 2012 (em cima); evolução temporal da condutividade elétrica dos pontos de água subterrânea menos mineralizados entre Maio de 2010 e Julho de 2012 (em baixo).

Fig. 5.5. Relação entre a condutividade elétrica e a altitude de todos os pontos de água entre Maio de 2010 e Julho de 2012 (em cima); relação entre a condutividade elétrica e a altitude dos pontos de água com menor mineralização entre Maio de 2010 e Julho de 2012 (em baixo).

Fig. 5.6. Diagrama de Stiff (adaptado de Fetter, 2001).

Fig. 5.7. Diagrama de Piper (adaptado de Custódio & Llamas, 1996).

Fig. 5.8. Diagrama semilogarítmico de Schoeller-Berkaloff (extraído de Fetter, 2001).

Fig. 5.9. *Facies* hidroquímicas (adaptado de IGM, 1999).

Fig. 5.10. Diagrama de Stiff com a média das campanhas de Inverno à esquerda e média das campanhas de Verão à direita.

Fig. 5.11. Diagramas de Piper relativos às médias das amostragens de Inverno (em cima), e de Verão (em baixo).

Fig. 5.12. Diagramas de Schoeller-Berkaloff relativos às médias de Inverno (em cima) e Verão (em baixo).

Fig. 5.13. Mapa hidrogeoquímico do setor Seia-Torre-Covilhã.

Capítulo 6. Hidrologia isotópica

Fig. 6.1. Teores médios de ^{18}O na precipitação derivados da base de dados da IAEA/WMO em função da latitude (adaptado de Rozanski *et al.*, 1993).

Fig. 6.2. Relação entre os teores de $\delta^{18}\text{O}$ na precipitação e a latitude da estação de amostragem (adaptado de Mook, 2000).

Fig. 6.3. Representação esquemática do “efeito de altitude e continentalidade” no fracionamento dos isótopos de oxigénio na atmosfera (adaptado de Mook, 2000).

Fig. 6.4. Representação esquemática do fracionamento dos isótopos de oxigénio no vapor de água atmosférico e precipitação (adaptado de Hoefs, 2004).

Fig. 6.5. Fracionamento isotópico da água e do vapor remanescente em processos de evaporação (adaptado de IAEA, 1981).

Fig. 6.6. Fracionamento isotópico na água residual (adaptado de University of Ottawa, 2013).

Fig. 6.7. Representação esquemática dos principais processos responsáveis pela variação nos valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ relativamente à reta das águas meteóricas mundiais; (GMWL: *Global Meteoric Water Line*; RAMMed: reta das águas meteóricas mediterrânicas) (adaptado de Geyh, 2000).

Fig. 6.8. Concentração de trítio na precipitação no período de ensaios termonucleares no séc. XX (adaptado de University of Ottawa, 2013).

Fig. 6.9. Representação esquemática da origem (natural e antrópica) e entrada de trítio no Ciclo Hidrológico (adaptado de Mook, 2000).

Fig. 6.10. Efeito de Continentalidade sobre a variação dos teores em trítio de águas de precipitação, em estações meteorológicas localizadas a diferentes longitude (adaptado de Ferronsky & Polyakov, 1982).

Fig. 6.11. a. Tendências a longo prazo para a concentração em trítio na precipitação em diversas estações da rede da IAEA/WMO. b. Distribuição dos teores de trítio na precipitação mensal em função da latitude para estações da rede de IAEA/WMO (adaptado de Gonfiantini *et al.*, 1990).

Fig. 6.12. Variação da concentração em trítio recorrendo a diferentes modelos matemáticos, admitindo como variáveis o teor inicial de trítio e o tempo de circulação subterrânea (cedido por Luis Aráguas, AIEA, 2010).

Fig. 6.13. Variação dos teores de $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ (LMWL- Local Meteoric Water Line; GMWL- Global Meteoric Water Line).

Fig. 6.14. Variação dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^2\text{H}$ com a temperatura da água.

Fig. 6.15. Relação entre $\delta^{18}\text{O}$ com e a temperatura da água, nos períodos de inverno e de verão médias, para as nascentes da encosta oriental e para as nascentes da encosta ocidental.

Fig. 6.16. Variação dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^2\text{H}$ com a altitude dos pontos amostrados.

Fig. 6.17. Projeção dos teores de cloreto e bicarbonato *versus* composição isotópica em oxigénio-18 para as nascentes não contaminadas no SSTC.

Fig. 6.18. Projeção dos teores de cloreto e bicarbonato *versus* composição isotópica em deutério para as nascentes não contaminadas no SSTC.

Fig. 6.19. Variação dos teores de ^3H ao longo do tempo para cada ponto de água (ver correspondência dos pontos de água no quadro 6.4).

Fig. 6.20. Teores médios de ^3H na Primavera e no Outono/Inverno para cada ponto de água (ver correspondência dos pontos de água no quadro 6.4).

Fig. 6.21. Variação dos teores médios de ^3H com a altitude das nascentes do SSTC.

Capítulo 7. Contaminação das águas subterrâneas

Fig. 7.1. Localização das rodovias no subsector Lagoa Comprida – Torre – Nave de Santo António (modificado de Carvalho *et al.*, 2012).

Fig. 7.2. Gráfico representativo da evolução temporal da relação Na/Cl de todos os pontos de água subterrânea entre Maio de 2010 e Julho de 2012.

Fig. 7.3. Diagrama de dispersão representativo da concentração em cloreto *versus* condutividade elétrica de todos os pontos de água subterrânea entre Maio de 2010 e Julho de 2012 (em cima); diagrama de dispersão representativo da concentração em cloreto *versus* condutividade elétrica dos pontos de água subterrânea não contaminados entre Maio de 2010 e Julho de 2012 (em baixo).

Fig. 7.4. Diagrama de dispersão representativo da concentração em sódio *versus* condutividade elétrica de todos os pontos de água subterrânea entre Maio de 2010 e Julho de 2012 (em cima); diagrama de dispersão representativo da concentração em sódio *versus* condutividade elétrica dos pontos de água subterrânea não contaminados entre Maio de 2010 e Julho de 2012 (em baixo).

Fig. 7.5. Localização relativa da Fonte da Saibreira e da Fonte da Nave de Santo António Sul. (Imagem de satélite de 6/06/2012; extraída do sistema Google Earth).

Fig. 7.6. Localização relativa da Fonte do Espinhaço de Cão. (Imagem de satélite de 6/06/2012; extraída do sistema Google Earth).

Fig. 7.7. Localização da Mina da Torre. (Imagem de satélite de 6/06/2012; extraída do sistema Google Earth).

Fig. 7.8. Localização relativa da Nascente da Lagoa Comprida. (Imagem de satélite de 25/06/2012; extraída do sistema Google Earth).

Fig. 7.9. Modelo conceptual do processo de contaminação da água subterrânea por substâncias de limpeza da neve em estradas na Serra da Estrela (adaptado de Carvalho *et al.*, 2012).

Fig. 7.10. Veículos de limpeza de neve utilizados na Serra da Estrela (retirado de Carvalho *et al.*, 2012).

Fig. 7.11. Locais dos estudos hidrogeofísico: vertente ocidental da Nave de Santo António (I); vertente oriental da Nave de Santo António (II); Fonte dos Perús (III).

Fig. 7.12. Localização dos perfis de resistividade elétrica traçados na Nave de Santo António.

Fig. 7.13. Perfis de resistividade elétrica na vertente oriental da Nave de Santo António.

Fig. 7.14. Perfis de resistividade elétrica na vertente ocidental da Nave de Santo António.

Fig. 7.15. Localização dos perfis de resistividade elétrica nas imediações da Fonte dos Perús.

Fig. 7.16. Perfis de resistividade elétrica nas imediações da Fonte dos Perús.

Fig. 7.17. Cromatogramas de duas das nascentes amostradas: (a) Fonte do Covão do Curral; (b) Fonte do Covão do Boi.

Índice de quadros

Capítulo 3. Enquadramento geológico, geomorfológico e climatológico

Quadro 3.1. Distribuição mensal do número de dias com precipitação, queda de neve e solo coberto de neve nas estações meteorológicas da região da Serra da Estrela (valores normais do período 1951-1980); extraído de INMG (1991).

Quadro 3.2. Resumo climatológico para o período de 2010-2012 na estação das Penhas Douradas (valores normais do período 1951-1980); extraído de INMG (1991).

Quadro 3.3. Distribuição mensal da precipitação total e da temperatura média do ar em estações meteorológicas da região da Serra da Estrela (valores normais do período 1951-1980); extraído de INMG (1991).

Capítulo 4. Enquadramento hidrogeológico

Quadro 4.1. Caraterísticas dos aquíferos da Bacia do Zêzere a Montante de Manteigas.

Quadro 4.2. Modelo da ficha de inventário hidrogeológico utilizada.

Quadro 4.3. Caraterísticas dos pontos de água monitorizados.

Capítulo 5. Hidrogeoquímica

Quadro 5. 1. Valores de temperatura, pH e condutividade elétrica das águas subterrâneas, medidos *in situ*.

Quadro 5. 2. Teores médios dos iões maioritários e sílica para as campanhas de Inverno e Verão.

Quadro 5. 3. Matriz de correlações entre valores de condutividade elétrica, teores de iões maiores e altitude para as águas não contaminadas.

Quadro 5. 4. *Facies* hidrogeoquímicas das águas do setor de Seia-Torre-Covilhã.

Capítulo 6. Hidrologia isotópica

Quadro 6.1. Resultados das análises isotópicas de deutério e oxigénio-18 das águas do sector de Seia-Torre-Covilhã.

Quadro 6.2. Registos da temperatura do ar na estação meteorológica das Penhas Douradas (série 1971-2000, base de dados do Instituto de Meteorologia, I. P.).

Quadro 6.3. Resultados das análises isotópicas de trítio das águas do sector de Seia-Torre-Covilhã.

Capítulo 7. Contaminação das águas subterrâneas

Quadro 7.1. Contaminantes presentes em ambiente rodoviário e suas principais origens (adaptado de James, 1999; Sansalone e Buchberger, 1997 e Leitão *et al.*, 2000a, *in* LNEC, 2006).

Quadro 7.2. Principais alteração da qualidade dos solos e águas como resultado de fogos florestais (extraído de LNEC, 2009).

Quadro 7.3. Composição química do sal-gema de Loulé e das águas amostradas a montante e jusante do SSTC.

Quadro 7.4. Concentração de metais pesados em amostras de sal-gema e águas do SSTC a montante e jusante da estrada.

Quadro 7.5. Teores médios de verão e inverno de sódio e cloreto para pontos de água potencialmente contaminados e não contaminadas.

Quadro 7.6. Efeito hidroquímico do fogo florestal de agosto de 2010 observado na Fonte do Covão do Curral.

Quadro 7.7. Níveis de HAPs encontrados em amostras ambientais e biológicas (LNEC, 2009).

Quadro 7.8. Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos prioritários (segundo a EPA).

Quadro 7.9. Concentração de HAPs nas águas subterrâneas amostradas em 2011.

Quadro 7.10. Concentração de HAPs nas águas subterrâneas amostradas em 2013.

Lista de abreviaturas

CXG – Complexo Xisto-grauváquico.

FBVM – Falha de Bragança-Vilariça-Manteigas.

FGSL – Falha de Gouveia-Seia-Lousã.

GMWL – *Global Meteoric Water Line*.

HAPs – Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos.

LMWL – *Local Meteoric Water Line*.

MWL – *Meteoric Water Line*.

PNSE – Parque Natural da Serra da Estrela.

SMOW – *Standard Mean Ocean Water*.

SSTC – Setor Seia-Torre-Covilhã.

TU – Unidades de Trítio (*Tritium Units*).

V-SMOW – *Vienna Standard Mean Ocean Water*.

ZCI – Zona Centro Ibérica.

1. Introdução

O projeto de investigação que enquadrou a elaboração da presente Tese de Doutoramento em Geociências teve como principal intuito aprofundar o conhecimento da hidrogeologia ambiental do Parque Natural da Serra da Estrela (setor de Seia-Torre- Covilhã).

A vida e o sustento da humanidade dependem da água. A procura de água doce tem aumentado com o crescimento populacional (Struckmeier *et al.*, 2005). Estima-se que, no momento presente, mais de mil milhões de pessoas no mundo não tenham água potável para se abastecer. Por outro lado, cerca de três mil milhões de pessoas são afetadas pela falta de acesso a uma alimentação adequada, pela degradação dos solos causada pela escassez de água, pela ausência de sistemas de saneamento básico e pela exposição a doenças relacionadas com a água (Gleick, 1998).

Segundo dados da Organização das Nações Unidas, ONU, em 2012 cerca de 1,6 mil milhões de pessoas viviam em regiões com escassez absoluta de água, sendo de prever que, em 2025, a escassez de água potável no planeta atinja cerca de dois terços da população mundial (Nações Unidas, 2012)

Uma vez que a fase subterrânea do Ciclo Hidrológico é inacessível à observação direta, esta é muitas vezes descorada em relação à componente superficial do mesmo (Fitts, 2002).

Habitualmente, a água subterrânea está menos sujeita à contaminação do que a superficial, uma vez que se encontra protegida à superfície pelo solo e pela cobertura rochosa. No entanto, o crescimento demográfico, as modificações do uso da terra e a industrialização acelerada, colocam este recurso em perigo (Struckmeier *et al.*, 2005; Tellam *et al.*, 2006).

Neste contexto, e face à atual sobreexploração e contaminação dos recursos hídricos mundiais, as regiões de montanha têm vindo a ser cada vez mais consideradas como “*Reservatórios de Água*” de importância estratégica no futuro próximo devido ao papel que desempenham no abastecimento de água doce para satisfazer as necessidades humanas (ex. Aureli, 2002; Hassan *et al.*, 2005).

Neste âmbito, devido às suas características geológicas, geomorfológicas e hidroclimatológicas, a Serra da Estrela apresenta-se como fonte de recursos hídricos de importância estratégica para Portugal (ex. Espinha Marques *et al.*, 2005; Espinha Marques *et al.*, 2010). O setor de Manteigas – Nave de Santo António – Torre, situado na região do Parque Natural da Serra da Estrela (PNSE) tem vindo a ser alvo de vários estudos de cariz hidrogeológico desde 2003 (ex. Espinha Marques, 2007; Marques *et al.*, 2008; Espinha Marques *et al.*, 2005, 2011a,b, 2013; Carreira *et al.*, 2011).

Contudo, tendo em conta o papel essencial do sistema hidrológico da Serra da Estrela na capacidade de abastecimento de água doce para as necessidades humanas em Portugal Continental, é fundamental prosseguir o seu estudo pormenorizado deste sistema recorrendo a metodologias e técnicas adequadas.

1. 1. Objetivos

O objetivo principal deste estudo consiste em aprofundar o conhecimento acerca da hidrogeologia ambiental da fase subterrânea do Ciclo Hidrológico do Parque Natural da Serra da Estrela (PNSE), no setor de Seia-Torre-Covilhã (SSTC).

Complementarmente, pretende-se que o presente trabalho contribua para melhorar o ordenamento territorial da região, para se praticar uma gestão mais racional dos seus recursos hídricos, bem como para a proteção de outros valores naturais relevantes, tais como a fauna e a flora.

Para alcançar os referidos objetivos levaram-se a cabo diversas tarefas de investigação, com destaque para as seguintes:

- realização de um inventário hidrogeológico;
- estabelecimento de uma rede de monitorização das águas subterrâneas;
- caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas;
- caracterização isotópica das águas subterrâneas (incluindo a determinação da sua variabilidade espacial e temporal através do efeito de altitude e da topografia);
- estudo hidrogeoquímico e hidrogeofísico do efeito ambiental da contaminação das águas subterrâneas.

1. 2. Localização Geográfica

A zona do estudo situa-se no maciço montanhoso da Serra da Estrela, na zona Centro de Portugal, com latitude entre 40° 15'N e 40° 38'N e longitude entre 7° 18'W e 7° 47'W. Insere-se na Cordilheira Central Ibérica (fig. 1.1), cadeia montanhosa de orientação ENE-WSW, com altitude de 1993 metros no local do PNSE conhecido como Torre. A altitude da encosta oriental varia entre 670 metros, na base da encosta, na Covilhã, e 1993 metros na Torre, enquanto que a encosta ocidental varia entre 565 metros, na base da encosta em Seia, e 1993 metros na Torre.

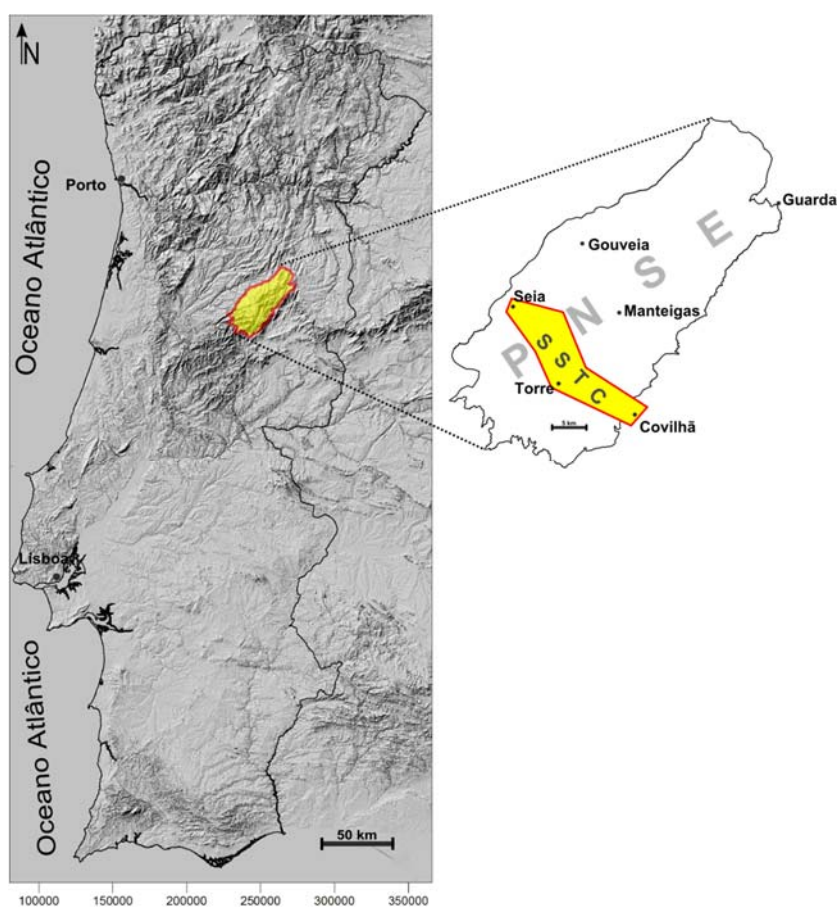


Fig. 1.1. Localização do setor de Seia – Torre – Covilhã (SSTC) no contexto de Portugal continental e do Parque Natural da Serra da Estrela (PNSE).

A região estudada distribui-se pelos concelhos de Seia e Manteigas pertencentes ao distrito da Guarda, e pelo concelho da Covilhã, pertencente ao distrito de Castelo Branco.

A geologia da área de estudo encontra-se caracterizada nas folhas 17D - Gouveia (Teixeira *et al.*, 1967), e 20B - Covilhã (Teixeira *et al.*, 1974), da Carta Geológica de Portugal. A cartografia topográfica da região corresponde às folhas 212 (Seia), 213 (Manteigas), 223 (Loriga – Seia), 224 (Teixoso – Covilhã), 234 (Unhais da Serra – Covilhã) e 235 (Covilhã), à escala 1/25 000, da Carta Militar de Portugal, publicada pelo Instituto Geográfico do Exército. A figura 1.2 representa, esquematicamente, a cobertura cartográfica desta região.

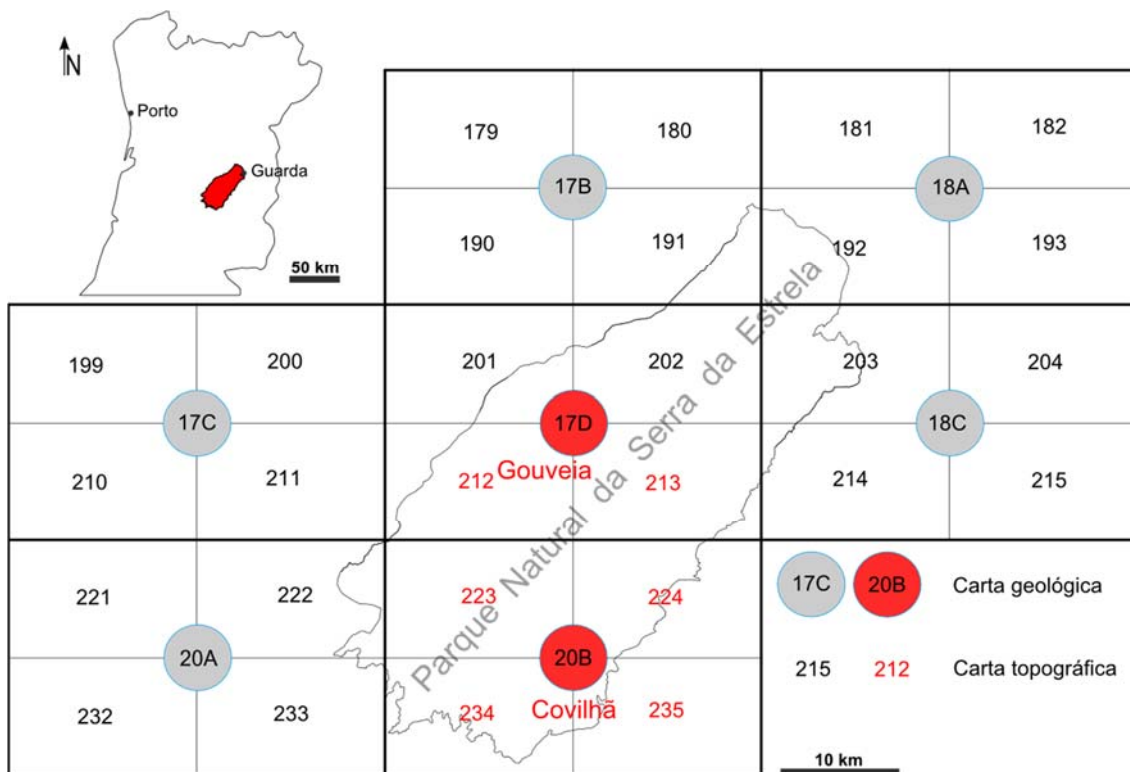


Fig. 1.2. Cartografia geológica (na escala 1/50 000) e topográfica (na escala 1/25 000) da região do PNSE (a cartografia da área estudada encontra-se destacada a vermelho).

1.3. Estrutura da Investigação

A estrutura da investigação, esquematicamente representada na figura 1.3, engloba um breve estudo da geologia, geomorfologia e climatologia regional do setor de Seia-Torre-Covilhã, como base para os trabalhos de investigação da hidrogeologia. A hidrogeologia ambiental inclui estudos de hidrogeoquímica convencional, hidrologia isotópica e contaminação das águas subterrâneas.

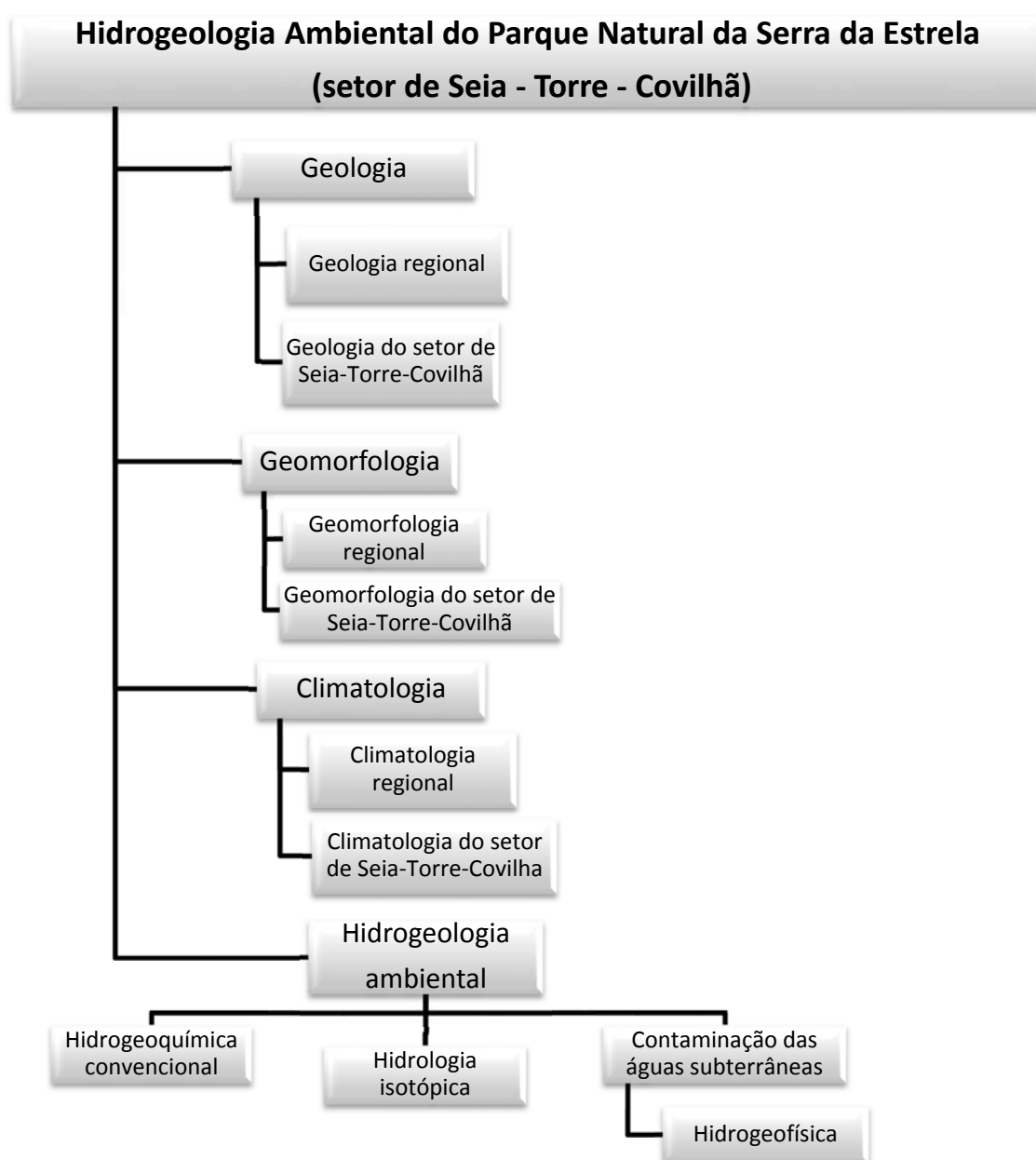


Fig. 1.3. Esquema representativo da estrutura da investigação.

1.4. Estudos anteriores

A primeira fase do presente estudo incluiu a pesquisa e consulta de trabalhos anteriores, com destaque para os realizados na área científica da Hidrogeologia. Segue-se uma síntese dos trabalhos consultados, destacando-se os trabalhos dos domínios da Geologia, da Geomorfologia, da Climatologia e da Hidrologia.

1.4.1. Geologia e Geomorfologia

Os primeiros estudos científicos relativos à Serra da Estrela foram realizados a partir de meados do século XIX. Destes, destacam-se os elaborados pelos autores Carlos Ribeiro e Nery Delgado (Ferreira & Vieira, 1999), com indicação das evidências de uma glaciação ocorrida na região. Datado de Agosto de 1881, o estudo levado a cabo pela Sociedade de Geografia de Lisboa, no âmbito da Expedição Científica à Serra da Estrela, abordou aspetos da geologia local (Daveau, 1981). Contudo, o tema da glaciação e dos vestígios glaciários presentes na região foi o que gerou mais interesse durante o final do século XIX e início do século XX, com destaque para autores como Pereira Cabral (1883-1887), Delgado (1888) e Fleury (1916).

Em 1927 e 1928, Herman Lautensach, realizou um conjunto de estudos de campo, os quais originaram o traçado do primeiro mapa da glaciação, com base topográfica na escala 1/100 000 e o reconhecimento da forma como o glaciário se desenvolveu, sendo possível estimar o limite inferior da altitude das neves perpétuas em 1650 metros. Os trabalhos realizados pelo autor permitiram-lhe, igualmente, determinar o zonamento da paisagem através dos vestígios atuais da glaciação (Lautensach, 1929, 1932a,b).

O estudo da origem tectónica da Serra da Estrela teve por base o estudo da morfologia da Guarda, pelo autor Pierre Birot (1946). Também Orlando Ribeiro, através de estudos sobre a estrutura e relevo da região efetuados entre 1949 e 1954, contribuiu para o conhecimento da tectónica, sugerindo que a Serra da Estrela teria resultado da elevação de diversos blocos, a diferentes altitudes, e não de apenas um único bloco (Ribeiro, 1949a,b; 1954; Ribeiro *et al.*, 1994).

Os vestígios da glaciação voltaram a ser alvo de estudo pela autora Suzanne Daveau que, desde 1969, efetuou trabalhos abarcando tanto este tema como o da estrutura e relevo da Serra da Estrela. A autora recuperou as ideias de O. Ribeiro relativas à origem da tectónica do relevo da região, fundamentando esta teoria com argumentos como o padrão da rede de drenagem hidrográfica, o posicionamento relativo de alguns depósitos, a morfologia das encostas, a ocorrência de águas termais e a orientação preferencial de filões. Suzanne Daveau foi também responsável pela definição rigorosa dos limites da zona de glaciação, sugerindo que a espessura do gelo terá atingido 80 m na zona aplanada em redor da Torre e 300 m em determinados locais da língua glaciária do Vale do Zêzere. Propôs, igualmente, uma classificação das línguas glaciárias, de acordo com a altitude mínima que estimou que teriam alcançado e a sua exposição, tendo os seus trabalhos culminado no traçado de um mapa da glaciação (fig.1.4) (Daveau, 1971, 1973, 1978).

No âmbito de trabalhos de prospeção levados a cabo pela Junta de Energia Nuclear, foi traçado um mapa geológico à escala 1/50 000 (Barros, 1964). A partir dessa década foram publicadas pelos Serviços Geológicos de Portugal as cartas geológicas que abrangem a zona de estudo, bem como as respetivas notícias explicativas elaboradas por Teixeira *et al.* (1961, 1963a, 1963b, 1967, 1974). A Carta Tectónica de Portugal na escala 1/1 000 000, foi publicada por Ribeiro *et al.* (1972) bem como a 4ª e 5ª edições da Carta Geológica de Portugal à escala 1/500 000 (Teixeira, 1972; Oliveira *et al.*, 1992).

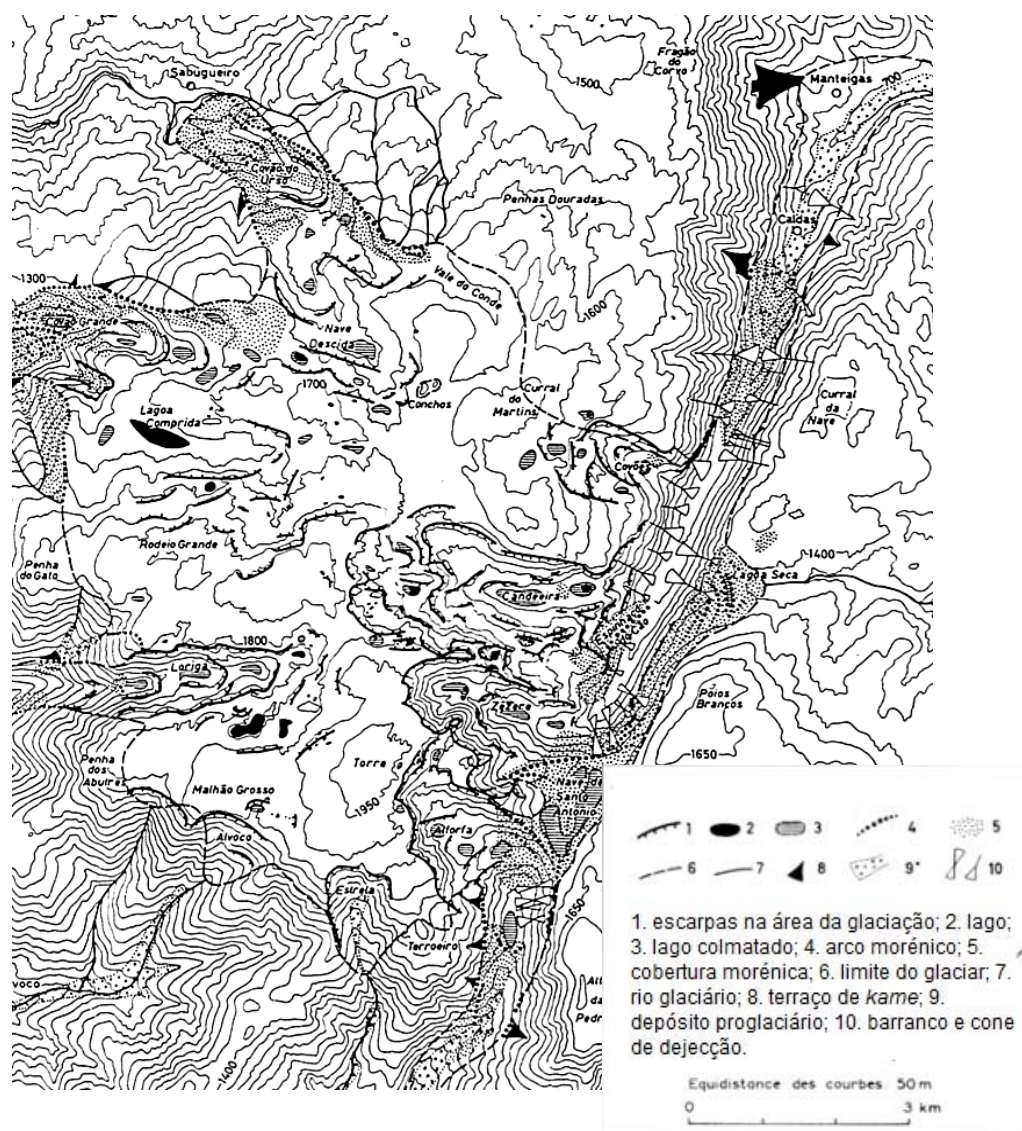


Fig. 1.4. Mapa da glaciação da Serra da Estrela (adaptado de Daveau, 1971).

Novos estudos relativos à tectónica levaram António Ribeiro, em 1988, a propor um modelo de acordo com o qual a Cordilheira Centro Ibérica corresponderia a um *horst*, cuja origem estaria relacionada com uma estrutura *pop-up* associada à tectónica compressiva alpina do tipo *thick-skinned* ao nível do soco varisco (Ribeiro, 1988; Ribeiro *et al.*, 1990a).

Dos vários autores que estudaram a neotectónica regional, em particular as estruturas ativas da Zona de Falha de Bragança-Vilarica-Manteigas, são de destacar os trabalhos de Ribeiro (1984), Moreira (1985), Cabral (1989, 1995), Brum Ferreira (1991), Mateus (1995), Mateus *et al.* (1995) e Veludo (2004).

O estudo dos litótipos graníticos da região foram alvo de estudos petrográficos, geoquímicos e petrogenéticos por Neiva *et al.*, datados de 1987.

Uma nova fase de estudos geomorfológicos na região foi marcada pelas observações da glaciação realizadas por Daveau *et al.*, em 1997. Dos trabalhos que se seguiram realçam-se os efetuados por Brum Ferreira (1998) com a síntese dos conhecimentos sobre a morfologia da Serra da Estrela, e por Vieira e Brum Ferreira (1998) acerca das características gerais da geomorfologia glaciária.

O “Guia geológico e geomorfológico do Parque Natural da Serra da Estrela”, trabalho síntese abrangendo aspetos mais relevantes da geologia e geomorfologia, foi publicado em 1999, por N. Ferreira e G. T. Vieira.

No ano de 2004, Daveau, elaborou uma nova síntese acerca da estrutura e relevo da Serra da Estrela. No decorrer do mesmo ano, G. T. Vieira publicou a sua tese de doutoramento na qual abordou o modelado e a dinâmica geomorfológica e a morfogénese atual dos planaltos e altos vales da região.

Cavaleiro *et al.* (2007) publicaram um estudo acerca das propriedades geotécnicas de um perfil de alteração do granito da Covilhã. Por seu lado, Sant’Ovaia *et al.* (2010) estudaram as estruturas magmáticas e o processo de instalação de granitos variscos do Centro de Portugal, incluindo a região da Serra da Estrela.

1.4.2. Climatologia

Em 1932, foi publicado por Herman Lautensach, um dos primeiros estudos integrados do clima português. Neste trabalho há várias referências à Serra da Estrela, tendo-se, mesmo, estabelecido comparações entre o clima local e o de outras regiões de Portugal Continental. Lautensach evidencia a diferenciação regional do clima e

apresenta uma divisão do país em províncias climáticas, inserindo a Serra da Estrela na Província Montanhosa do Norte de Portugal.

Outros trabalhos acerca das características climáticas locais foram desenvolvidos, sendo de destacar os realizados por Narciso (1930-1931), Ferreira (1943) e Morais (1946, 1950). No seguimento dos trabalhos de Lautensach, O. Ribeiro (1954) evidenciou o papel que as montanhas, como a Cordilheira Central, assumem na distribuição espacial da precipitação e da temperatura do ar.

A série de fascículos intitulada “O Clima de Portugal”, publicada a partir de 1942, fornece informações da rede nacional de estações meteorológicas. Destacam-se os fascículos que referem características climáticas da Serra da Estrela, tais como: os valores médios dos elementos climáticos no período de 1901-1930 (fascículo I – Amorim Ferreira, 1942); clima da região da Beira (fascículo V – Amorim Ferreira, 1946); normais climatológicas do Continente, Açores e Madeira no período de 1931-1960 (fascículo XIII – Amorim Ferreira, 1970); estudo do balanço climatológico da água no solo e classificação climática de Portugal (fascículo XXIV – Mendes & Bettencourt, 1980) e normais climatológicas do Continente, Açores e Madeira no período de 1951-1980 (fascículo XLIX – INMG, 1991).

Entre os anos de 1972 e 1985, a autora Suzanne Daveau, publicou uma série de trabalhos com referência a diversos aspetos do clima de Portugal Continental assinalando, entre outros: aspetos da distribuição espacial, frequência e ritmo anual da precipitação; ritmos diários e anuais da temperatura; o papel da Cordilheira Central no contraste climático entre o Norte e o Sul do país; a repartição espacial da precipitação na Serra da Estrela; e a proposta de classificação climática de Portugal, a qual inclui a Serra da Estrela na classe dos “maciços de clima diferenciado”, sub-classe das “montanhas” (Daveau *et al.*, 1985).

Publicado pela Comissão Nacional do Ambiente a partir de 1975, o “Atlas do Ambiente”, conjunto de mapas na escala 1/1 000 000, representa cartograficamente, entre outras, informações de relevância climatológica como a insolação (Azevedo & Marques, 1987), a temperatura média do ar (CNA, 1984a) e a precipitação (CNA, 1984b).

Com recurso aos dados de várias estações meteorológicas, o Plano de Ordenamento do Parque Natural da Serra da Estrela apresentou em 1987 uma caracterização climática pormenorizada da região. O autor Ventura (1988) investigou os padrões de ocorrência de temperaturas máximas e mínimas em Portugal Continental verificando a ocorrência de fortes contrastes térmicos entre as regiões Norte e Centro, a altitudes superiores a 200 m. Este trabalho dedicou especial atenção à região da Serra da Estrela, onde a frequência e duração dos períodos com temperaturas mínimas diárias negativas é maior. Alcoforado *et al.* (1993) investigaram a transição entre os domínios climáticos de feição atlântica e mediterrânea em Portugal Continental.

A partir da década de 90 do séc. XX foram publicados diversos trabalhos acerca do clima da região da Serra da Estrela. Destacam-se os estudos elaborados por Andrade *et al.* (1992), acerca das características da neve local; os de Vieira & Mora (1998), sobre os traços gerais dos regimes de precipitação, temperatura e ventos; e Mora *et al.* (2001), com padrões das temperaturas mínimas diárias do ar na Serra da Estrela. A temperatura do solo e suas implicações geomorfológicas foram estudadas por autores como Vieira & Ramos (2001), Vieira *et al.* (2002, 2003a) e Vieira (2004).

Posteriormente, um conjunto de estudos de caracterização do clima de Portugal Continental, contendo diversas referências à Serra da Estrela, foi publicado por Santos *et al.* (2002, 2006), no qual se evidencia o impacto das alterações climáticas sobre os ecossistemas e os sistemas socioeconómicos.

No ano de 2006, a autora Carla Mora publicou uma tese de doutoramento dedicada às características climáticas da região da Serra da Estrela com o intuito de compreender a sua dinâmica e padrões de distribuição espacial. A autora estudou a distribuição espacial da temperatura e da precipitação e os contrastes entre as faixas ocidental e oriental da região. Em 2009, a autora publicou um estudo relativo aos padrões térmicos no Alto Vale do Zêzere no qual define quatro padrões térmicos principais para a região, com base na informação recolhida por uma rede de postos termométricos. A mesma autora publicou, em 2010, um estudo cartográfico acerca da influência do relevo da Serra da Estrela sobre a distribuição espacial dos padrões locais de temperatura do ar.

AEMET (Agencia Estatal de Meteorologia) e IM (Instituto de Meteorologia de Portugal) (2011), publicaram o “Atlas Climático Ibérico”, o qual teve por base a informação das normais climatológicas do período 1971-2000. Neste trabalho é possível encontrar informações acerca dos elementos climáticos Temperatura do ar e Precipitação, bem como a classificação de Köppen para a Península Ibérica, incluindo a Serra da Estrela.

1.4.3. Hidrologia e Hidrogeologia

As primeiras referências de cariz técnico e/ou científico à hidrologia e hidrogeologia da Serra da Estrela remontam a 1726, data da publicação da obra “Aquilégio Medicinal”, que apresenta um inventário de pontos de água, entre os quais águas subterrâneas termominerais, águas subterrâneas normais e alguns pontos de água superficiais da região (Henriques, 1726).

Os autores Lepierre, Torres e Luzes *et al.*, durante os anos de 1930 a 1935, foram os responsáveis pelos estudos que levaram à publicação da obra “Le Portugal

Hydrologique et Climatique”, abrangendo aspetos como a hidroquímica e hidrogeologia das águas termais, incluindo algumas da região da Serra da Estrela.

O autor Luiz Acciaiuoli publicou diversos trabalhos com aspetos hidrogeológicos e hidrogeoquímicos de sistemas hidrominerais da Serra da Estrela (Acciaiuoli 1944, 1952-1953). Por seu lado, os autores Amaro d’Almeida e J. Duarte de Almeida publicaram, em 1975, o trabalho “Inventário Hidrológico de Portugal” o qual incluiu informações da hidrogeoquímica de águas termominerais e subterrâneas normais da região da Serra da Estrela. É, ainda, de referir o estudo hidroquímico das águas minerais das Caldas de Manteigas, realizado por Herculano Carvalho (1968).

A cartografia das nascentes minerais à escala 1/1 000 000, foi publicada por Almeida & Moura (1972), e posteriormente por Calado (1992), no Atlas do Ambiente. Entre 1990 e 2001 foram publicados vários trabalhos acerca da hidrogeologia e hidrogeoquímica das águas subterrâneas portuguesas, sendo de assinalar, pelo interesse para a região da Serra da Estrela, os realizados por Carvalho *et al.* (1990), Cruz & Silva (1991), Calado & Almeida (1993) e Calado (2001).

A circulação em aquíferos graníticos da Serra da Estrela foi alvo de estudos geofísicos realizados por Veiga (1999). No mesmo ano, o Instituto Geológico e Mineiro (IGM) lançou, em formato digital, o “Catálogo de recursos geotérmicos em Portugal Continental (baixa entalpia)” o qual inclui informações sintetizadas sobre os sistemas termominerais de Manteigas e Unhais da Serra. O Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) disponibilizou *on-line*, em 2010, uma nova versão deste catálogo.

É de referir um conjunto de trabalhos técnicos realizados por CPS (s/data), DGRAH (1984), SNPRCN (1987), ACavaco (1990-1994), INAG (1999), destinados a apoiar a gestão de recursos hídricos, a prospeção, a pesquisa e a captação de águas subterrâneas ou superficiais, ou ordenamento de território.

Relativamente à hidrogeologia da Serra da Estrela, destacam-se, sobretudo, os trabalhos realizados no âmbito do Projeto *HIMOCATCH “Papel das áreas montanhosas na recarga de recursos hídricos – Centro de Portugal”*, o qual dedicou particular atenção ao tema “Alta Montanha como Reservatório de Água da Humanidade” (ex. Afonso *et al.*, 2006; Espinha Marques 2007; Espinha Marques *et al.*, 2005, 2007, 2009, 2011a,b, 2013; Marques *et al.*, 2008; Carvalho, 2008; Carvalho *et al.*, 2012; Carreira *et al.*, 2011).

No contexto do referido projeto, procurou-se aprofundar o conhecimento acerca da dinâmica do sistema hidrogeológico da Serra da Estrela existente na bacia do rio Zêzere a montante de Manteigas (fig. 1.5). Especificamente, foram realizados estudos que incluíram:

- a descrição da zona não saturada, incluindo feições hidropedológicas como condutividade hidráulica e as curvas características dos solos;
- a definição, a descrição e a cartografia de unidades hidrogeomorfológicas na Bacia do Zêzere a Montante de Manteigas (BZMM);
- a realização de estudos hidrogeoquímicos destinados à caracterização de águas subterrâneas e, complementarmente, superficiais;
- a deteção da poluição de águas subterrâneas e superficiais por sal-gema proveniente da limpeza da neve nas estradas de acesso à Torre;
- a realização de estudos isotópicos para estimar a possível altitude das áreas de recarga do sistema hidromineral, bem como “idades” aparentes de infiltração de águas minerais e subterrâneas normais;
- a elaboração de um modelo hidrogeológico conceptual da BZMM, com definição de aquíferos distintos e delimitação das suas prováveis áreas de recarga.

Por último, importa referir o trabalho de Rodrigues *et al.* (2010), referente a um estudo preliminar sobre o impacto da utilização de sais na limpeza de neve e gelo das estradas sobre a qualidade da água subterrânea.

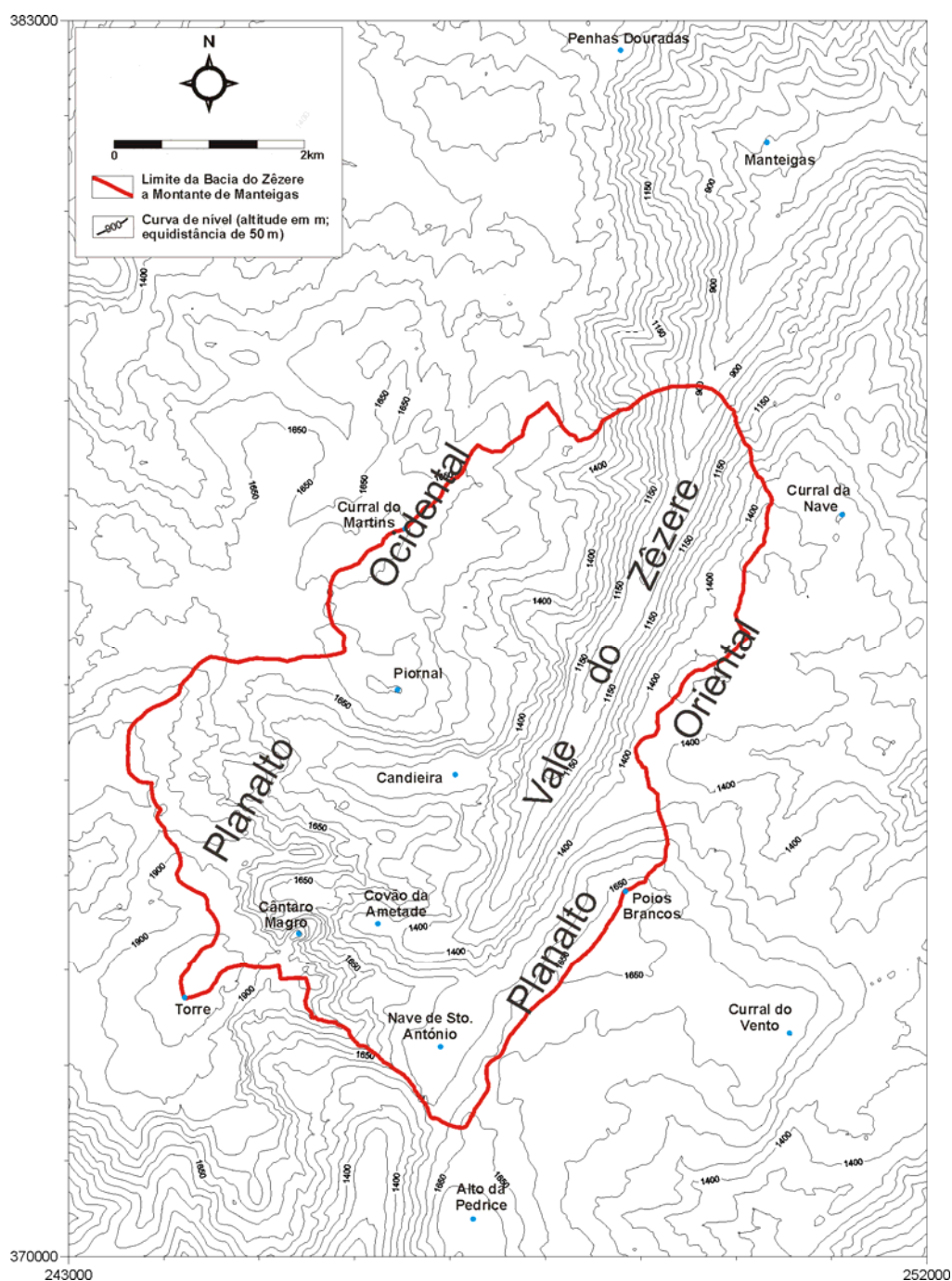


Fig. 1.5. Área abrangida pelo estudo hidrogeológico do projeto HIMOCATCH (extraído de Espinha Marques 2007).

2. Métodos e técnicas

A Hidrogeologia é um domínio científico de cariz claramente multidisciplinar e interdisciplinar, dada a necessidade de se compreender a complexidade das interligações que constituem o Ciclo Hidrogeológico (ex. Domenico & Schwartz, 1998; Fetter, 2001). Desta forma, tal como foi referido anteriormente, o presente trabalho recorre a metodologias e técnicas de estudo originárias de diversos ramos das Geociências, tais como: a Geologia, a Geomorfologia, a Climatologia, a Hidrogeologia, a Geoquímica, a Hidrologia Isotópica e a Geofísica.

Os trabalhos de investigação, realizados entre Maio de 2010 e Julho de 2012, compreenderam as seguintes tarefas de campo, laboratório e gabinete:

- Breve caracterização geológica, geomorfológica, climatológica e hidrogeológica, às escalas regional e local;
- Realização de um inventário hidrogeológico;
- Definição de uma rede de monitorização de água subterrânea representativa da área de estudo;
- Realização de campanhas de amostragem de água subterrânea para o estudo hidrogeoquímico e isotópico;
- Análise química das águas amostradas para determinação de componentes maiores e menores e caracterização das *facies* hidrogeoquímicas;
- Estudos de hidrologia isotópica para determinação de teores de deutério (^2H) e de oxigénio-18 (^{18}O), com vista à identificação da reta das águas meteóricas

locais correspondente às vertentes oriental e ocidental da Serra da Estrela; determinação de teores em trítio (^3H) nas águas subterrâneas;

- Estudo do impacto das substâncias utilizadas na limpeza de neve das estradas sobre a água subterrânea através de métodos hidrogeoquímicos e geofísicos;
- Investigação da ocorrência de modificações hidrogeoquímicas em consequência da infiltração das águas de escorrência das estradas (não relacionadas com a limpeza da neve) e de fogos florestais;
- Estudo da presença, na água subterrânea, de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos resultantes de fogos florestais.

As diferentes fases do estudo contaram com os métodos e técnicas a seguir descritos.

2.1. Caraterização geológica, geomorfológica e climatológica

Diversos autores têm vindo a salientar o efeito que os fatores geológicos (litologias e estruturas tectónicas), geomorfológicos e climatológicos, exercem sobre o funcionamento dos sistemas hidrogeológicos (ex. Castany, 1972; Custódio & Lamas, 1996; Fitts, 2002). Desta forma, o presente estudo teve como etapa inicial a caracterização geológica, geomorfológica e climatológica da área de estudo. Esta caracterização foi feita através de pesquisa bibliográfica e da observação e interpretação de dados *in situ*.

A caracterização geológica da Serra da Estrela foi realizada a partir da cartografia geológica, à escala 1/50 000, de Teixeira *et al.* (1967 e 1974), e na carta

geológica sintetizada de Ferreira & Vieira (1999), tendo como principal foco as unidades geológicas e a tectónica da região.

A caracterização geomorfológica incidiu, especialmente, no estudo do relevo atual, tendo-se, para isso, recorrido a estudos anteriores tais como Lautensach (1929, 1932a,b), Daveau (1969, 1971, 1973), Ferreira & Vieira (1999) e Vieira (2004).

Procurando-se apresentar um quadro climatológico regional, destacando os regimes de temperatura do ar e de precipitação, a caracterização climatológica teve por base os trabalhos de diversos autores como, por exemplo, Daveau (1972), Vieira & Mora (1998), Vieira (2004) e Mora (2006).

2.2. Caracterização hidrogeológica

2.2.1. Inventário hidrogeológico

O inventário hidrogeológico é, habitualmente, considerado como o ponto de partida mais adequado para os estudos hidrogeológicos uma vez que permite, de forma eficaz e económica, a recolha de informações sobre a hidrogeologia do local a estudar (ex. Custodio & Llamas 1996; Moore, 2002; Friedel, 2005). Consiste numa listagem de pontos de água que devem permitir a definição de uma rede de monitorização abrangendo a globalidade da área de estudo (Custódio & Llamas, 1996).

Custodio & Llamas (1996) definem “ponto de água” como um local ou obra de engenharia que permite o acesso direto ou indireto ao aquífero.

Dado que o primeiro objetivo da maioria dos programas de amostragem de águas subterrâneas é colher amostras representativas do sistema aquífero, são vários os autores que afirmam que um estudo hidrogeológico deve iniciar-se pela inventariação de pontos de água (ex. Pulido, 1978; Custódio & Llamas, 1996; Sanders, 1998; Stone, 1999; Moore, 2002).

Assim, uma das tarefas iniciais do estudo hidrogeológico do setor de Seia-Torre-Covilhã consistiu na realização de um inventário de pontos de água, com o intuito de se definir uma rede de monitorização de água subterrânea. O principal critério adotado na escolha de pontos de água a diferentes altitudes, nas vertentes ocidental e oriental da Serra da Estrela, teve em conta alguns dos objetivos do trabalho:

- a verificação do efeito da altitude e do relevo sobre a composição isotópica das águas de precipitação;
- o estudo hidrogeoquímico da água subterrânea.

Foram, igualmente, considerados critérios complementares na seleção dos pontos de água a integrar a rede de monitorização:

- apresentarem caudal durante todo o ano;
- serem acessíveis a viaturas, pessoas e equipamentos mesmo em situações meteorológicas pouco favoráveis.

2.2.2. Hidrogeoquímica

Habitualmente, o estudo das águas subterrâneas, começa com a determinação *in situ*, no local de emergência, da temperatura, pH e condutividade elétrica da água.

A determinação dos teores de solutos dissolvidos é, geralmente, feita em laboratório pelo que há necessidade de recolher amostras de água, que devem ser

analisadas o mais rapidamente possível a fim de se reduzir ao mínimo a alteração da sua composição química. Os iões habitualmente analisados são os aniões cloreto (Cl^-), bicarbonato (HCO_3^-), nitrato (NO_3^{2-}) e sulfato (SO_4^{2-}), e os catiões sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+). A sílica (SiO_2), substância não-iónica, é também, normalmente, analisada.

Os resultados da determinação da composição química das águas são, habitualmente, apresentado em mg/L. Contudo, de forma a facilitar a efetuação de cálculos envolvendo resultados analíticos e a realização de comparações entre análises de águas distintas, esses resultados são, muitas vezes, convertidos em equivalentes químicos (Hem, 1985).

No caso do presente estudo, foram realizadas várias campanhas de amostragem de águas subterrâneas no setor de Seia-Torre-Covilhã (ver capítulo 5).

A determinação dos parâmetros físico-químicos (temperatura, pH e condutividade elétrica) das águas subterrâneas no local de emergência, contou com a utilização de um instrumento da marca Hanna Instruments®, modelo HI 991300 (fig. 2.1), com as seguintes características:

- Temperatura ($^{\circ}\text{C}$): medição por uma sonda com intervalo de temperatura entre 0,0 e 60,0 $^{\circ}\text{C}$ e uma resolução de 0,1 $^{\circ}\text{C}$;
- pH (escala de Sorensen): utilização de eléctrodo para o intervalo entre 0,00 e 14,00 e resolução de 0,01;
- Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$): eléctrodo para o intervalo entre 0 e 3999 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com resolução de 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

As análises químicas convencionais (ou seja, referentes aos iões maiores e à sílica) foram realizadas no Departamento de Saúde Ambiental – Unidade de Água e Solo, do Laboratório de Química e Toxicologia do Instituto Nacional de Saúde Doutor Ricardo Jorge, no Porto.



Fig. 2.1. Instrumento Hanna Instruments® modelo HI 991300.

A amostragem foi feita em cada ponto de água, tendo sido recolhido 1L de amostra num frasco de polietileno de alta densidade de tampa simples (fig. 2.2). As amostras foram conservadas a baixas temperaturas até à sua análise.

As técnicas analíticas utilizadas foram: cromatografia iónica (CI) para determinação dos teores de Na^{2+} , K^{+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^{-} , SO_4^{2-} , e NO_3^{-} ; o teor de HCO_3^{-} foi determinado por cálculo da alcalinidade e o teor de SiO_2 por fluxo contínuo segmentado (FCS). Os valores obtidos foram tratados graficamente com recurso ao programa RockWorks 2002, utilizado para a construção de diagramas de Piper e de Stiff.

A cromatografia iónica é um tipo específico de cromatografia líquida de alta eficiência, cujo objetivo é a determinação de espécies iónicas. Recorre à permuta iónica ou formação de pares iónicos para fazer a separação das espécies existentes numa mistura, fazendo a separação e determinação de iões com recurso a resinas capazes de separar catiões e aniões em fases estacionárias (Harris, 1998). Esta técnica analítica apresenta uma precisão de cerca de 0,1 mg/L.

O cálculo do teor de HCO_3^- , tem por base a determinação da alcalinidade das amostras. A alcalinidade das águas é dada, sobretudo, pelo seu teor em aniões bicarbonato, carbonato e hidróxido. A determinação da alcalinidade pode ser realizada por método de titulação utilizando o indicador fenolftaleína para pH inferiores a 8,3. A alcalinidade de bicarbonato pode ser calculada segundo a equação:

$$\text{HCO}_3^- = T - 2P + [\text{OH}^-],$$

em que T é a alcalinidade total da amostra e P a alcalinidade da fenolftaleína (ex. Larson & Henley, 1955; Jenkins & Moore, 1977).

O fluxo contínuo é uma técnica de análise que se caracteriza pelo transporte de amostra e reagentes num fluxo líquido ou gasoso ao longo de um sistema. A amostra, após a sua introdução no fluxo transportador, entra em contacto com um ou mais reagentes, produzindo uma reação que é enviada a um detetor, no qual é produzido um sinal analítico cuja intensidade é relacionada com o parâmetro a determinar. No fluxo contínuo segmentado a aspiração das amostras para um canal é alternada com a introdução de bolhas de ar no sistema. As bolhas de ar devem ser eliminadas antes de chegar ao detetor para não interferirem com o sinal analítico resultante (Karlberg & Pacey, 1989).



Fig. 2.2. Frasco de amostragem para análise química dos iões maiores.

A análise química completa foi realizada no laboratório Actlabs – Activation Laboratories Ltd., no Canadá. Para a realização desta análise, foi colhida uma amostra de água, em Julho de 2012, em cada ponto de amostragem, em frasco de polietileno de rolha dupla com capacidade de 100 mL. As amostras colhidas foram filtradas e aciduladas com HNO₃. Foram analisadas 60 espécies químicas, através do método ICP – MS (Indutively Coupled Plasma – Mass Spectrometry).

O método de análise de espectrometria de massa com plasma indutivo acoplado (ICP – MS) é um tipo de espectrometria de massa de alta sensibilidade capaz de detectar iões metálicos e alguns não metálicos em concentrações até 1 para 10¹² (partes por trilião) (Batsla *et al.*, 2012). O ICP – MS tem vindo a ser utilizado ao longo dos últimos anos em diversas áreas de investigação, nomeadamente, na determinação da qualidade da água, em hidrogeologia, geologia, metalurgia e engenharia alimentar (Montaser & Golightly, 1992). O plasma conta com uma fonte de energia gerada por correntes elétricas com origem na indução eletromagnética, sendo responsável pela ionização das amostras enquanto que o espectrómetro faz a separação e quantificação dos seus iões (ex. Montaser & Golightly, 1992; Batsla *et al.*, 2012).

2.2.3. Hidrologia isotópica

O protocolo de amostragem de águas subterrâneas para determinação dos teores em isótopos estáveis de oxigénio (¹⁸O) e hidrogénio (²H) passou pela recolha de uma amostra água, em cada ponto de água selecionado, em frascos de polietileno de alta densidade de tampa dupla ou em frascos de vidro, também de tampa dupla. A quantidade de água colhida oscilou entre 50 e 100 mL, no caso da determinação dos teores em isótopos estáveis, existindo sempre o cuidado de se encher totalmente o

recipiente, tendo em particular atenção a não existência de bolhas de ar. Na área de estudo foram apenas colhidas essencialmente amostras de águas em nascentes, no entanto, é importante referir que no caso de a amostragem ser realizada em furos é necessário proceder-se à colheita da amostra à “boca” do furo e ter a certeza que a amostra é representativa do sistema e não esteve retida na tubagem. No que respeita à colheita de amostras de água para a determinação de trítio (^3H) utilizaram-se frascos de polietileno de alta densidade com tampa dupla e capacidade de 500 mL (fig. 2.3), com cuidados semelhantes (amostra representativa do sistema, enchimento total do recipiente e a ausência de bolhas de ar).



Fig. 2.3. Amostragem de águas subterrâneas para determinação da composição isotópica (a); frascos de amostragem para análise de ^3H – frasco polietileno de 500 mL – e de ^2H e ^{18}O – frasco de vidro de 100 ml (b).

As análises isotópicas foram realizadas no Laboratório de Isótopos Ambientais do Instituto Tecnológico e Nuclear (atualmente Campus Tecnológico e Nuclear / Instituto Superior Técnico), de acordo com os métodos analíticos de Epstein & Mayeda (1953), para a determinação do teor de $\delta^{18}\text{O}$, e de Friedman (1953), para determinação do teor de $\delta^2\text{H}$. A técnica de enriquecimento eletrolítico e posterior medição das taxas de contagem por cintilação líquida foi a metodologia utilizada para a determinação do teor de ^3H .

Os resultados dos teores em ^{18}O e ^2H são expressos em notação delta, por desvio em permilagem, relativamente ao padrão internacional V-SMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*). Por sua vez, os resultados dos teores em ^3H são expressos em Unidades de Trítio (TU, *Tritium Units*). A incerteza média associada aos resultados de cada uma das espécies isotópicas analisadas é de 0,1‰ para as medições de oxigénio-18 e de 1‰ para os valores de deutério. Relativamente ao trítio, a incerteza média associada a estas determinações é de 0,6TU dependendo da concentração inicial na amostra de água.

As metodologias laboratoriais utilizadas no estudo da hidrologia isotópica foram as seguintes:

- A determinação dos valores de ^2H em amostras de água, segundo o método proposto por Friedman (1953), envolve as seguintes etapas:
 - i) a 2,1 g de zinco (fracção granulométrica $>1,00$ e $<1,60$ mm, não oxidada) adicionar a amostra de água (9 μl) tendo cuidado de colocar a pequena quantidade de água no topo do zinco; colocar o frasco com a mistura na linha de vazio (preparação das amostras) em azoto líquido ($-196\text{ }^\circ\text{C}$), de forma que a amostra congele e não seja removida pelo vácuo (fig. 2.4 a). Este processo dura entre 5 a 10 minutos aproximadamente;

- ii) após esse tempo, abrir cada uma das amostras, de forma a que seja feito vázio no interior do recipiente onde se encontra a amostra de água congelada e o zinco;
- iii) esperar que o vázio atinja uma pressão de 10^{-3} bar ; após este valor ter sido atingido, passar da bomba rotativa para a bomba difusora de modo a que se atinja uma pressão de vázio superior (10^{-4}) bar, durante cerca de 30 minutos;
- iv) após esse tempo, os recipientes são fechados, ainda na linha de vázio, com vista a manter-se uma atmosfera inerte na amostra; os recipientes são retirados da linha de vácuo e introduzidos num forno tubular cerâmico para que ocorra a reação de redução do zinco a temperatura superior a 480°C , em atmosfera inerte. A redução do zinco com a água com vista à obtenção de hidrogénio gás demora entre 30 minutos a uma hora;
- v) após as amostras serem retiradas do forno, e com vista a uma homogeneização do gás resultante (hidrogénio), esperar cerca de 2 horas antes da determinação dos valores de $\delta^2\text{H}$ no espectrómetro de massa (fig. 2.4 b);
- vi) a amostra é acoplada ao espectrómetro de massa, o gás resultante da redução (hidrogénio) é medido alternadamente amostra/padrão (hidrogénio gás de composição $\delta^2\text{H}=0\text{‰}$). Os resultados obtidos são normalizados ao V-SMOW.
- O método de determinação da composição isotópica de ^{18}O , segundo Epstein & Mayeda (1953), envolve quatro etapas:

i) colocam-se 3 mL de amostra de água num recipiente da linha de preparação de amostras (ISOPREP) acoplada ao espectrómetro de massa SIRA 10 da VG-ISOGAS. Após ter sido feito vázio (bomba rotativa) aproximadamente durante 6 minutos, o gás padrão (CO_2 de composição isotópica conhecida) é introduzido no recipiente com a amostra;

ii) com vista a conseguir-se um equilíbrio isotópico (amostra-CO₂ padrão), os recipientes contendo as amostras – gás padrão são agitadas levemente durante 5 horas, à temperatura constante de 25°C, de modo a favorecer a troca isotópica e a conseguir-se atingir equilíbrio isotópico entre o oxigénio da molécula de água (amostra) e o oxigénio do dióxido de carbono (gás – padrão) (fig. 2.4 c);

iii) quando o equilíbrio isotópico é alcançado, o CO₂, presente no recipiente, possui uma ‘nova’ composição isotópica (resultante do equilíbrio isotópico do gás padrão com a amostra de água). Após ter sido feito vazio em toda a linha de transferência ISOPREP – espectrómetro, este “novo” gás é transferido da ISOPREP para o espectrómetro de massa para medição dos teores em ¹⁸O;

iv) o CO₂ (gás ‘de equilíbrio’) é medido no espectrómetro de massa alternadamente amostra/padrão. Os resultados obtidos são normalizados ao V-SMOW.

- O método utilizado para a preparação de amostras de água para determinação do seu teor em ³H, de acordo com o descrito em IAEA (1976), consiste em:

i) destilação, à pressão ambiente (fig. 2.4 d), de 350 a 400 mL de amostra em balão de pirex de fundo redondo de 500 mL. Para evitar uma ebulição tumultuosa, que levaria à perda excessiva de amostra e a uma destilação deficiente, são adicionadas esferas de pirex (núcleos de ebulição), ao balão de destilação. A ebulição dura em média cerca de 4 a 5 horas, podendo o processo ser mais moroso uma vez que varia de amostra para amostra. São realizadas 3 ou mais destilações até se atingir um valor de condutividade elétrica inferior a 2 µS/cm;

ii) após a destilação, cada amostra irá ser introduzida numa célula eletrolítica. No caso particular do laboratório de determinação de trítio instalado no ITN, são colocadas 18 dessas células numa arca refrigeradora para o processamento de 14

amostras (de água de composição isotópica desconhecida) por cada eletrólise. Antes de serem introduzidas nas células eletrolíticas, são adicionados 1 g de peróxido de sódio (Na_2O_2) às amostras de água (150 mL) colocadas em balão volumétrico de 250 mL o qual é cheio até perfazer o volume pretendido. O Na_2O_2 , irá atuar como eletrólito devido à sua elevada condutividade elétrica. De forma a controlar a possível perda de amostra, as células eletrolíticas são pesadas antes e após a introdução da solução obtida. As pesagens servem para determinar/controlar o peso inicial de amostra, tendo em atenção que, ao misturar-se água e peróxido de sódio, há libertação de oxigénio, e consequente alteração do peso;

iii) as células eletrolíticas são colocadas nos tanques de arrefecimento (arca eletrolítica refrigeradora), ligadas em série a uma fonte de alimentação (corrente elétrica com uma voltagem específica), estando todas as células ligadas ao exterior, designado por “borbulhadores” de silicone, que serve para controlar o processo de eletrólise. Após a estabilização da temperatura, cerca de 30 minutos, inicia-se o processo de eletrólise que consiste na aplicação de diversas fases com diferentes valores de intensidade elétrica. Findo o processo, as células são novamente pesadas e 18 a 20g de amostra são obtidas;

iv) após a redução de volume da amostra e consequentemente da concentração dos teores de ^3H , 10 mL de amostra, são colocados em frascos de polietileno, onde se adicionam 12 mL de líquido de cintilação (Packard-Ultima Gold LLT). Ao conjunto de amostras, que irão ser medidas no contador de cintilação líquida, juntam-se 3 águas de fundo (água padrão sem trítio) e 3 soluções padrão (com teor de trítio conhecido) que são colocadas no contador de cintilação como controle. No contador de cintilação líquida (PACKARD Liquid Scintillation Analyzer - Tri-Carb 2000 CA/LL.21), são colocadas 24 “amostras”, sendo em cada uma delas efetuada uma contagem de emissão de radiação β durante 60 minutos (fig.

2.4 e). Cada ciclo total é repetido 9 vezes. O cintilador registra as contagens de radiação emitidas pelas amostras as quais são, posteriormente, convertidas para Unidades de Trítio (TU, *Tritium Units*) através de um programa de Basic.



Fig. 2.4. (a) Frascos com amostra e zinco na linha de preparação em azoto líquido (determinação dos teores de ^2H); (b) Frascos com amostra para leitura no espectrómetro de massa (determinação dos teores de ^2H); (c) Frascos com amostra na ISOPREP para agitação (determinação dos teores de ^{18}O); (d) Destilação à pressão ambiente (determinação dos teores de ^3H); (e) Contador de cintilação líquida Packard (determinação dos teores de ^3H).

2.2.4. Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs)

A determinação dos teores de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) foi realizada no Departamento de Saúde Ambiental – Unidade de Água e Solo, do Laboratório de Química e Toxicologia do Instituto Nacional de Saúde Doutor Ricardo Jorge, no Porto.

A amostragem de águas foi feita com recurso a frascos de vidro com 1 L de capacidade. A metodologia utilizada para a preparação das amostras foi a extração em fase sólida com cartucho, tendo sido a determinação dos teores de HAPs feita por cromatografia gasosa acoplada a espetrometria de massa (GC-MS), com o aparelho da marca SHIMADZU, modelo QP 2010 (fig. 2.5).

A metodologia de cromatografia gasosa acoplada a espetrometria de massa, foi criada com o intuito de se identificarem substâncias distintas numa amostra. Assim, dado que a cromatografia gasosa é capaz de separar e analisar substâncias em misturas voláteis, enquanto que a espetrometria de massa caracteriza cada um dos componentes individualmente, a combinação das duas técnicas possibilita a análise quantitativa e qualitativa e a avaliação de soluções contendo uma série de produtos químicos (ex. Ewing, 2002; Atkins & Jones, 2011). Esta metodologia recorre a um cromatógrafo gasoso e um espectrómetro de massa (Atkins & Jones, 2011).



Fig. 2.5. Cromatógrafo gasoso com espectrómetro de massa acoplado, marca SHIMADZU modelo QP2010 (extraído de Shimadzu, 2013).

2.2.5. Hidrogeofísica

Os estudos geofísicos realizados no setor de Seia-Torre-Covilhã utilizaram a metodologia da resistividade elétrica. O método da resistividade elétrica baseia-se no facto de, em geral, materiais geológicos diferentes apresentarem resistividades elétricas diferentes (Kearey *et al.*, 2002). O desenvolvimento deste método processa-se a partir do estudo de campos elétricos criados artificialmente por injeção no terreno duma corrente elétrica, e relacionando-os, depois, com as características geológicas do local. A aplicação deste método tem como intuito determinar a resistividade elétrica dos terrenos em estudo, num ou em vários pontos da superfície dos mesmos, e o conhecimento da sua distribuição espacial segundo planos verticais (ex. Parasnis, 1972; Loke, 1999).

Para a determinação do potencial à superfície do terreno injeta-se uma corrente elétrica num ponto, através de um dispositivo de medição formado por quatro elétrodos (fig. 2.6), destinando-se dois deles (*A* e *B*), positivo e negativo, à injeção da corrente elétrica no terreno, e os outros dois (*C* e *D*) à receção ou medição de diferenças de potencial criadas pela injeção da corrente. R_A representa a resistência entre *A* e *D* e R_B a resistência entre *D* e *B*. A distância entre *A* e *C* é dada por r_A enquanto que r_B se refere à distância entre *C* e *B*. A partir dos valores da corrente (*I*) e tensão (*V*), é possível calcular o valor da resistividade aparente (ρ_a), de acordo com a equação:

$$\rho_a = k \frac{V}{I}$$

onde *k* é o fator geométrico, dependente do arranjo dos quatro elétrodos.

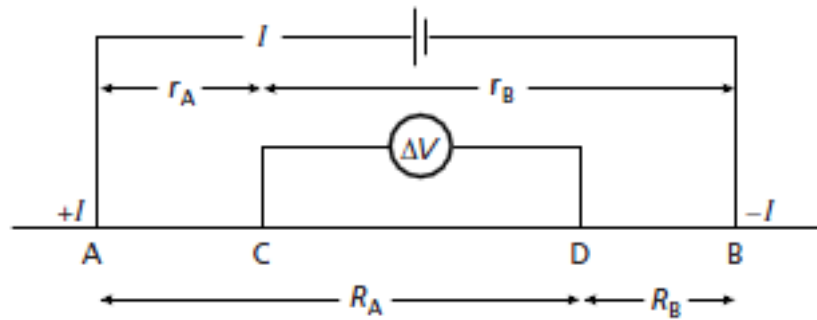


Fig. 2.6. Esquema representativo de um sistema de prospecção por resistividade elétrica (extraído de Kearey, et al., 2002).

Os métodos de resistividade, normalmente, fornecem um valor de resistência, $R = V/I$, assim, na prática, o valor da resistividade aparente, pode ser calculado pela fórmula:

$$\rho_a = k R$$

A figura 2.7, representa a configuração típica da instalação de uma série de elétrodos ao longo de uma linha reta, ligada a um cabo *multi-core*. Habitualmente, o espaçamento entre elétrodos adjacentes é constante. O cabo *multi-core*, é anexado a um medidor de resistividade (fig. 2.8), que é ligado a um computador portátil. A sequência de registos das medidas, o tipo de matriz a utilizar, bem como outros parâmetros de pesquisa, são, normalmente, inseridos no formato de ficheiros de texto, podendo ser lido por um programa informático adequado, num computador portátil. Após a leitura do ficheiro de controlo, o programa de computador seleciona, automaticamente, os elétrodos utilizados para cada medição (Loke, 1999).

Para um dado número de elétrodos colocados ao longo de um perfil, o número de medições que se pode obter depende da configuração geométrica utilizada. De notar que, com o aumento do espaçamento entre elétrodos, diminui o número de medições.

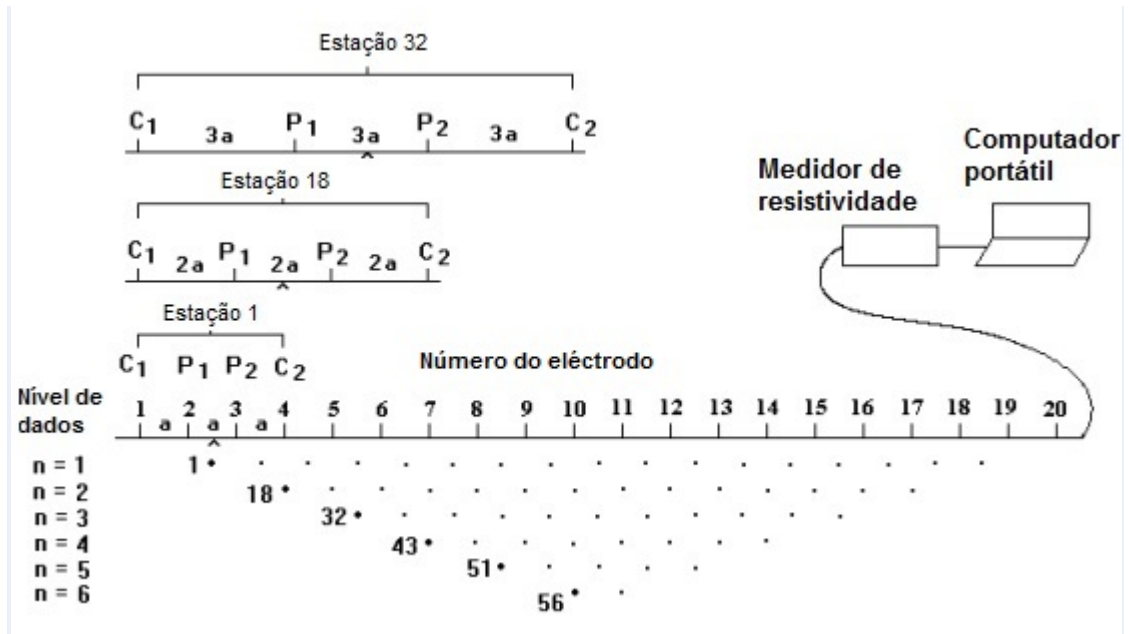


Fig. 2.7. Arranjo de eléctrodos para levantamento de um perfil de prospecção de resistividade elétrica (adaptado de Loke, 1999).

O presente estudo foi realizado com recurso ao aparelho da marca Iris Instruments, modelo Syscal R1 Plus (fig. 2.8), sendo os dados recolhidos tratados com o programa RES2DINV.



Fig. 2.8. Equipamento de medição da resistividade elétrica da marca Iris Instruments, modelo Syscal R1 Plus.

Apesar de existirem vários dispositivos geométricos de medição com quatro elétrodos, os mais utilizados são os dispositivos simétricos de Wenner e Schlumberger (ex. Parasnis, 1972; Kearey *et al.*, 2002). O dispositivo geométrico de Wenner (fig. 2.9), utilizado no presente estudo, é o que apresenta o menor número de medições possíveis, comparativamente a outros dispositivos utilizados em levantamentos 2-D.

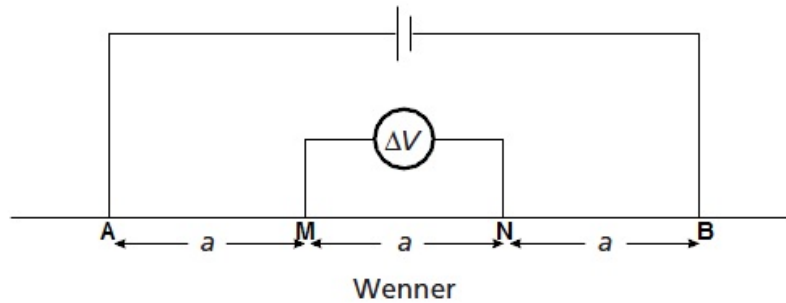


Fig. 2.9. Configuração dos elétrodos nos dispositivos de Wenner (adaptado de Kearey *et al.*, 2002).

Para representar os dados de uma prospeção de resistividade elétrica numa imagem 2-D, é habitualmente utilizada uma representação em pseudo-secção (fig. 2.10). As pseudo-secções dão uma imagem muito aproximada da distribuição da resistividade real. Contudo, fornecem uma imagem distorcida do subsolo, devido à influência da forma dos contornos, dependente do dispositivo de distribuição dos elétrodos utilizado, e da resistividade real do subsolo (Loke, 1999).

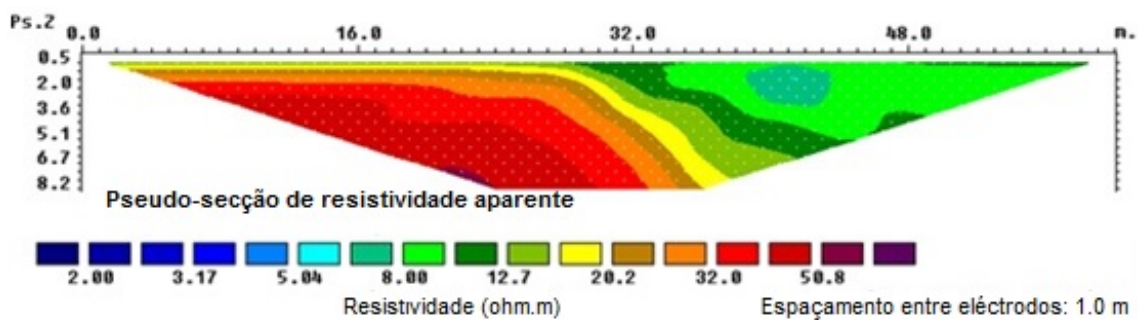


Fig. 2.10. Exemplo de uma pseudo-secção de uma medição de resistividade aparente (adaptado de Loke, 1999).

2.3. Nota sobre os conceitos de Contaminação e de Poluição

Os conceitos de contaminação e de poluição são, na bibliografia do domínio das Ciências do Ambiente, apresentados de diferentes modos, consoante a perspectiva de cada autor. Em determinados casos, os termos são considerados sinónimos enquanto que, noutros, correspondem a aceções diferentes, por vezes contraditórias entre si (ex. Calvo, 1995; Ferreira, 1997; Fetter, 1999; Feitosa, 2000; Fitts, 2002, Chapman, 2007).

No presente trabalho adotam-se as seguintes definições:

- Contaminação da águas subterrânea: é a presença, na água subterrânea, de um agente químico ou biológico numa concentração superior aos valores de fundo (*background*) tornando a água imprópria para um uso específico (Fetter, 1999; Chapman, 2007).
- Poluição da água subterrânea: é a presença de um agente químico ou biológico num meio em concentração que provoque danos aos seres humanos ou a quaisquer organismos que dependam desse meio (Porteous, 2000; Chapman, 2007; Knödel *et al.*, 2007).

A legislação portuguesa, concretamente, a Lei da Água, define “poluição” de modo concordante com o anteriormente apresentado: “a introdução direta ou indireta, em resultado da atividade humana, de substâncias ou de calor no ar, na água ou no solo que possa ser prejudicial para a saúde humana ou para a qualidade dos ecossistemas aquáticos ou dos ecossistemas terrestres daqueles diretamente dependentes, que dê origem a prejuízos para bens materiais ou que prejudique ou interfira com o valor paisagístico ou recreativo ou com outras utilizações legítimas do ambiente” (artigo 4º, lei nº58/2005 de 29 de Dezembro).

Ao longo do texto, aplicar-se-á, regra geral, o termo “contaminação”, o qual, no sentido exposto, é mais abrangente e dispensa a avaliação dos danos que, eventualmente, ocorram nos seres vivos.

3. Enquadramento geológico, geomorfológico e climatológico

A Serra da Estrela é uma montanha pertencente à Cordilheira Central Ibérica, de orientação ENE-WSW, a qual corresponde a uma morfoestrutura do tipo “montanha em blocos” (Ribeiro, 1954), estendendo-se desde a Serra da Lousã até Somosierra (Espanha), numa área com cerca de 500 km de comprimento e 40 km de largura (fig. 3.1).



Fig. 3.1. A Serra da Estrela no contexto da Península Ibérica (fotografia de satélite de março de 2008, extraída de NASA, 2013).

O maciço montanhoso da Serra da Estrela corresponde a um relevo com, aproximadamente, 115 km de comprimento e 25 km de largura, com direção NE-SW, localizada entre a Serra da Lousã e a cidade da Guarda. Situa-se a uma latitude compreendida entre 40° 15' N e 40° 38' N e longitude entre 7° 18' W e 7° 47' W. Atinge uma altitude máxima de 1993 m, na Torre, correspondendo, assim, ao ponto mais elevado de Portugal Continental.

3.1. Geologia

As feições geológicas da Serra da Estrela condicionam, em grande medida, o funcionamento dos sistemas hidrogeológicos aí existentes. São disso exemplo a forma como influenciam os processos de infiltração e de recarga dos aquíferos, o tipo de circulação, os percursos da água subterrânea e os processos hidrogeoquímicos (Espinha Marques, 2007).

3.1.1. Enquadramento geológico regional

Situada na Zona Centro Ibérica (ZCI) do Maciço Centro Ibérico (Ribeiro *et al.*, 1990a), a Serra da Estrela é dominada pela ocorrência de rochas graníticas, formadas durante o ciclo Varisco, e por rochas metassedimentares do Précâmbrico-Câmbrico, as quais se incluem no Grupo das Beiras do Complexo Xisto Grauváquico Ante-Ordóvicico (CXG). Estão também presentes pequenas áreas de rochas sedimentares correspondentes a depósitos de cobertura aluvionar, glaciária e fluvioglaciária e a

sedimentos arcósico-argilosos (Teixeira *et al.*, 1967, 1974, Ferreira & Vieira, 1999) (fig. 3.2).

Segundo Ferreira & Vieira (1999) estão presentes duas formações do CXG na região da Serra da Estrela: (i) Formação de Malpica do Tejo, a qual inclui, fundamentalmente, metagrauvaques e, ainda, filitos e metaconglomerados; (ii) Formação do Rosmaninhal, que inclui, essencialmente, filitos com intercalações de metagrauvaques. Observa-se metamorfismo regional de baixo grau (da fácies dos xistos verdes), bem como dobras com plano axial com direção NW-SE originadas pela atividade tectónica Varisca.

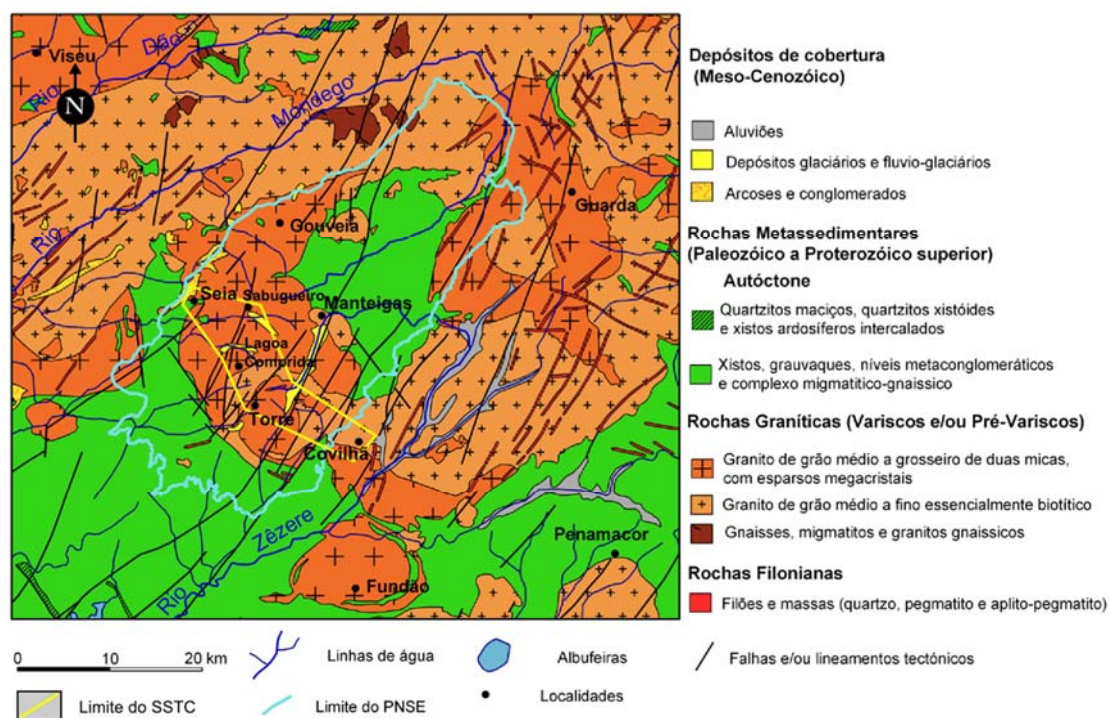


Fig. 3.2. Geologia da região da Serra da Estrela (simplificado de Oliveira *et al.*, 1992).

Os granitóides da Serra da Estrela, de idade Varisca, encontram-se numa faixa com orientação NW-SE, localizada entre o Alto Minho e as Beiras, a qual é paralela aos megacisalhamentos do Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão e de Vigo-Régua

(Ferreira *et al.*, 1987; Ribeiro *et al.*, 1979, 1990b). Na cartografia geológica de Oliveira *et al.* (1992) os granitóides desta região são caracterizados e classificados como orogénicos, sendo alguns sin- e outros tardi- a pós-tectónicos, relativamente à fase de deformação F_3 .

As fácies graníticas identificadas na Serra da Estrela foram classificadas de acordo com a textura, a granularidade e a composição mineralógica (Teixeira *et al.*, 1961, 1963a, 1963b, 1967, 1974, Ferreira & Vieira, 1999). À escala regional, domina um granito de duas micas, porfiróide e de grão grosseiro. Na zona central do maciço granítico existe um plutão com estrutura zonada, constituído por granitos moscovíticos juntamente com granitos de duas micas (ex. Ferreira & Vieira, 1999).

As megadescontinuidades da Falha de Bragança-Vilarica-Manteigas (FBVM), com direção NNE-SSW, e da Falha Gouveia-Seia-Lousã (FGSL), com direção NE-SW, dominam a neotectónica da Serra da Estrela. Estas estruturas estão associadas ao episódio mais recente da fracturação tardi-varisca (Ribeiro *et al.*, 1979) e exibem uma movimentação predominantemente inversa, testemunhando uma importante atividade neotectónica (Cabral & Ribeiro, 1988, 1989) — fig. 3.3.

Segundo Ribeiro (1988) a formação da Cordilheira Central Ibérica está diretamente relacionada com a colisão entre as placas Euroasiática e Africana, durante a orogenia Alpina. Neste processo, terá ocorrido a compressão das Cadeias Béticas originando um descolamento na base da crosta (ao nível do Moho), correspondendo a Cordilheira Central a uma estrutura “de ressalto” (do tipo *pop-up*) entre um cavalgamento para NNW e um retrocavalgamento para SSE (fig. 3.4). De acordo com o modelo proposto por este autor, a Cordilheira Central corresponde a um *horst* compressivo orientado subparalelamente à Cordilheira Bética (fig. 3.4), sendo delimitado, a NNW e a SSE, por acidentes tectónicos paralelos, que provocam o cavalgamento do Soco Varisco Ibérico sobre a Cobertura Meso-Cenozóica. Neste

modelo, a Serra da Estrela está delimitada pela FGSL (a noroeste) e pela Falha de Pônsul (a sudeste) (fig. 3.3).

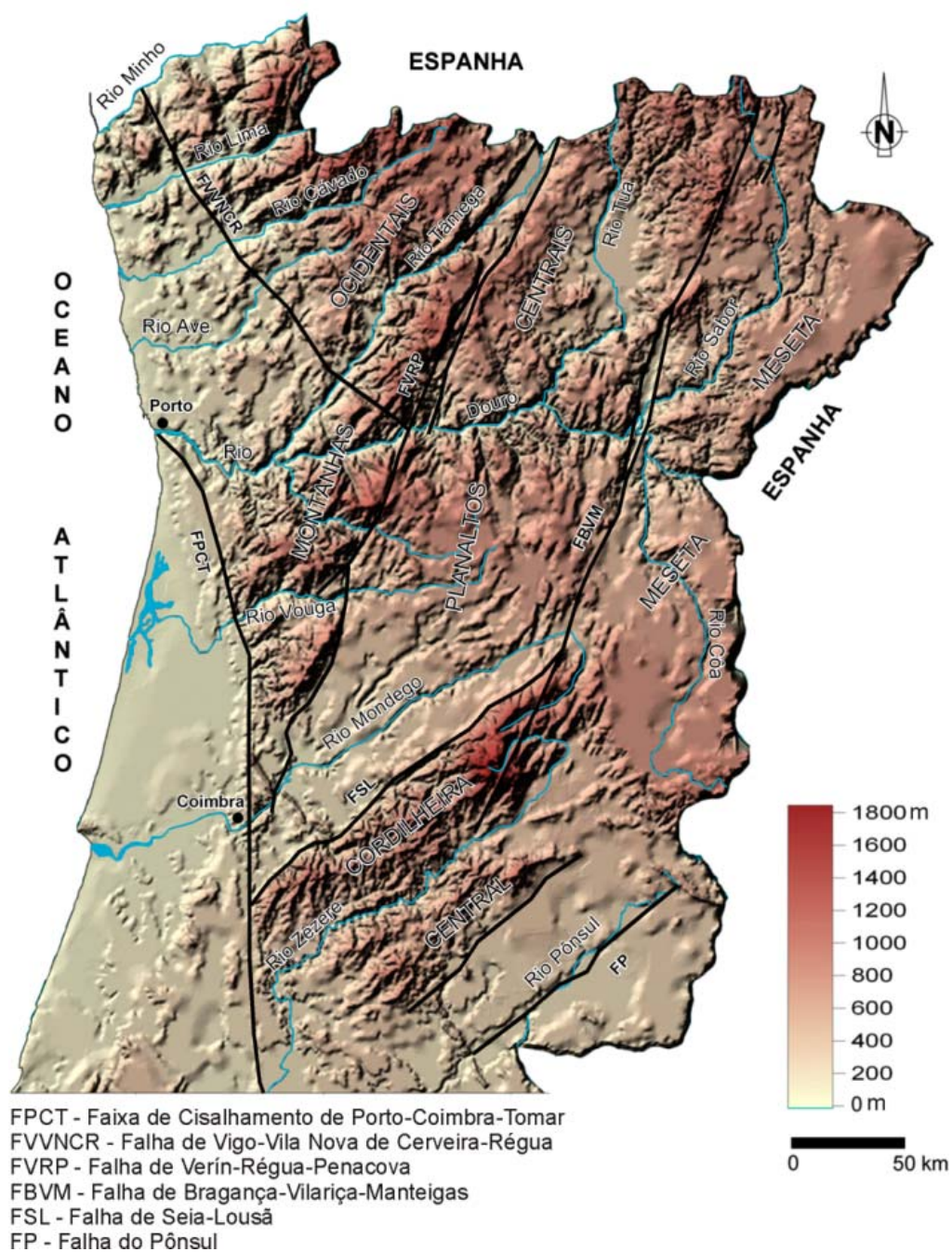


Fig. 3.3. Principais estruturas tectónicas do Norte e Centro de Portugal (adaptado de Carvalho, 2006).

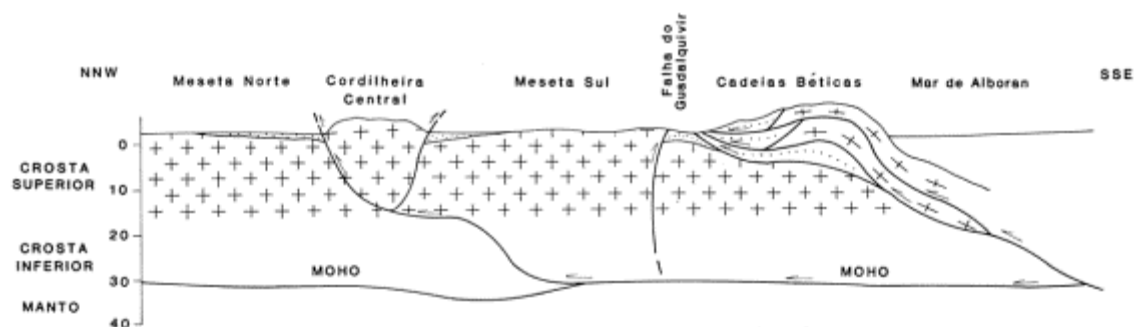


Fig. 3.4. O modelo da formação da Cordilheira Central (extraído de Ribeiro, 1988).

A evolução geológica da Serra da Estrela pode ser resumida da seguinte forma (fig. 3.5), segundo Ferreira & Vieira (1999) e Vieira (2004):

- Precâmbrico a Câmbrio médio-superior (de cerca de 650 Ma até cerca de 500 Ma): deposição de sedimentos clásticos em meio marinho que, por ação da diagénese e do metamorfismo, formaram as rochas atuais do CXG;
- Durante a Orogenia Varisca ou Hercínica (de cerca de 380 Ma – Devónico médio – até cerca de 240 Ma – Pérmico superior): ação das várias fases compressivas que resultaram na deformação das rochas do CXG por eventos dúcteis e frágeis;
- Carbonífero (desde cerca de 330 Ma até cerca de 290 Ma): instalação de granitos por diversos impulsos;
- Mesozoico: formação da geoforma aplanada Superfície Fundamental, por erosão dos níveis superiores da crosta e consequente *uplift*, por alívio da carga, com aproximação à superfície das rochas mais profundas;
- Início do Cenozoico (desde cerca de 10 Ma até cerca de 2 Ma): reativação de acidentes tectónicos variscos pelas forças compressivas da Orogenia Alpina. Ascensão, por impulsos, dos blocos que compõe a Serra da Estrela. A atividade tectónica, que se mantém até à atualidade, manifesta-se ao nível das estruturas regionais pela ocorrência de águas termominerais;

- Durante Plistocénico superior: ocorrência de várias fases frias, sendo de destacar a ocorrência do Último Máximo de Glaciação na Serra da Estrela à cerca de 30 000 anos (Vieira, 2004).

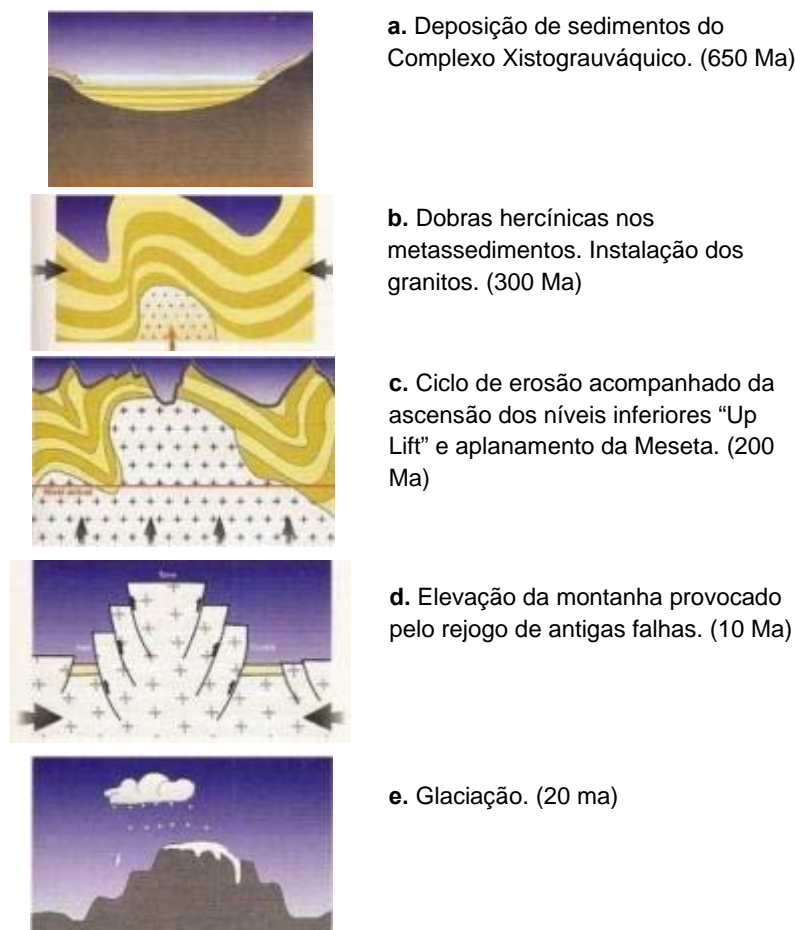


Fig. 3.5. Evolução geológica da Serra da Estrela (adaptado de Ferreira & Vieira, 1999).

3.1.2. Enquadramento geológico local

A região do sector de Seia-Torre-Covilhã é formada, essencialmente, por rochas graníticas variscas, verificando-se também a ocorrência de pequenas massas de rochas metassedimentares do Complexo Xisto Grauváquico de idade Precâmbrica-Câmbrica, bem como depósitos glaciários, fluvioglaciários e aluvionares do

Plistocénico Superior e do Holocénico (fig. 3.6). A Falha de Bragança-Vilariça-Manteigas, é a mais importante estrutura tectónica à escala local.

Unidades geológicas

Vários têm sido os autores a estudar as unidades geológicas da Serra da Estrela (ex., Teixeira *et al.*, 1961, 1963a, 1963b, 1967, 1974; Neiva *et al.*, 1987; Oliveira *et al.*, 1992; Ferreira & Vieira, 1999; Sant'Ovaia *et al.*, 2010). No presente capítulo faremos a descrição das mesmas com base na cartografia geológica na escala 1/50 000 bem como no trabalho de Ferreira & Vieira (1999) (fig. 3.7).

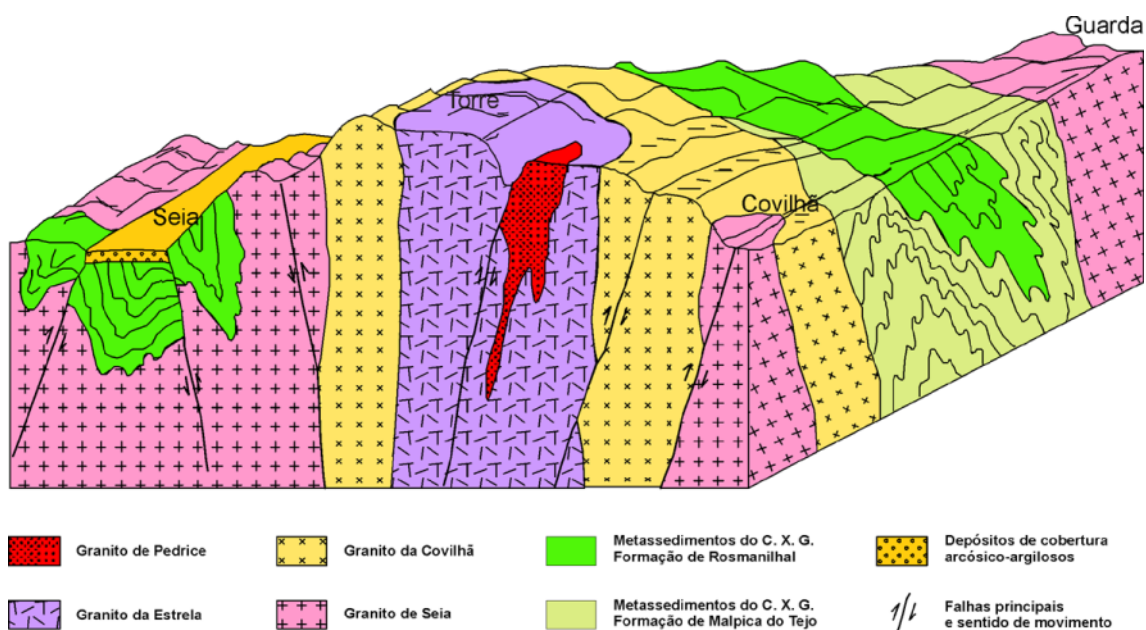


Fig. 3.7. Bloco-diagrama esquemático da geologia da Serra da Estrela (extraído de Ferreira & Vieira, 1999).

Depósitos de cobertura

Aluviões (a): Formadas sobretudo por areias e cascalheiras com origem na erosão das rochas graníticas e xistentas, estes depósitos sedimentares atuais, de pequena espessura, depositam-se ao longo de vales e canais fluviais (fig. 3.8).

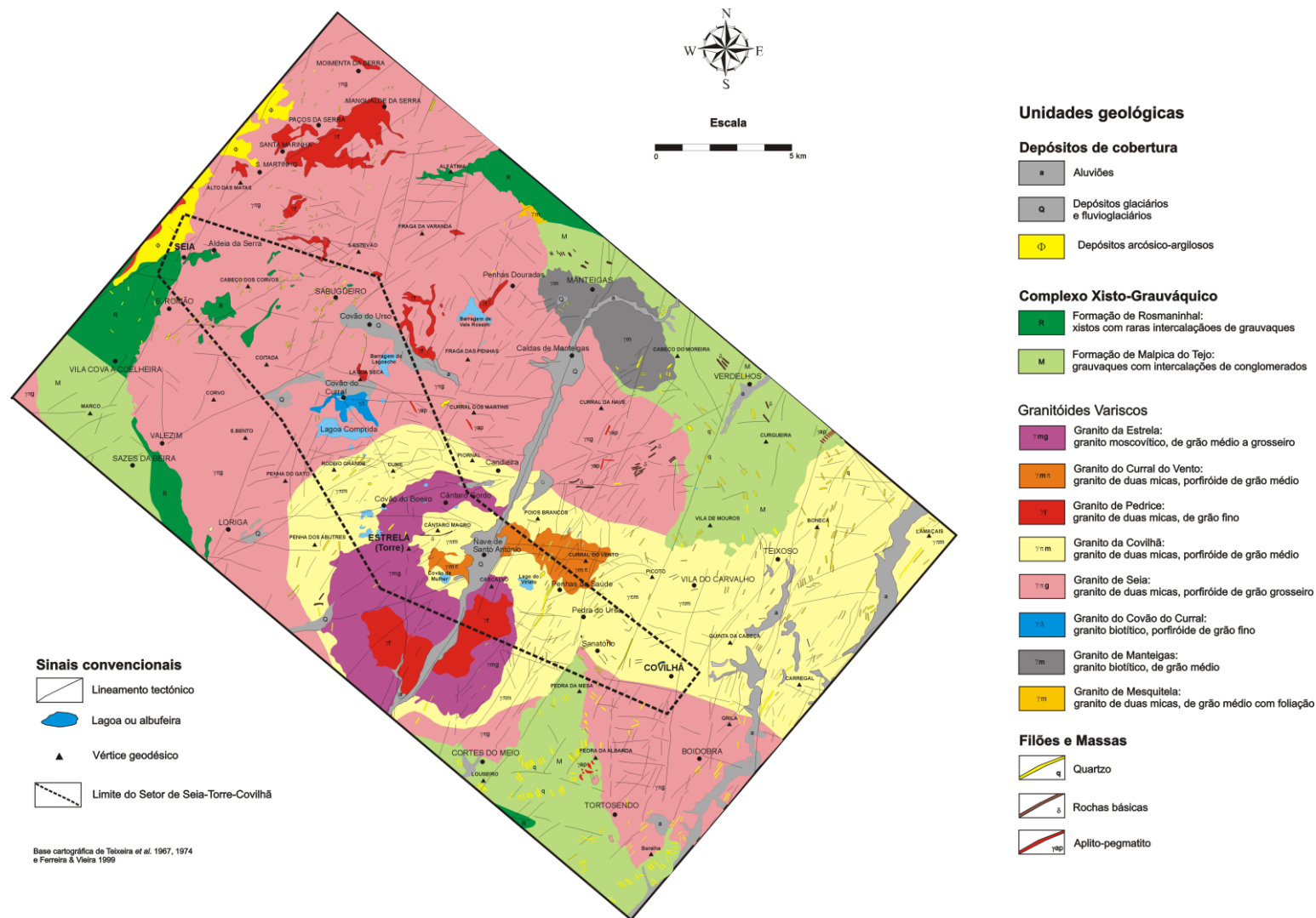


Fig. 3.6. Mapa geológico do setor de Seia-Torre- Covilhã.

Depósitos glaciários e fluvioglaciários (Q): são depósitos originados durante a última glaciação, pelos processos da erosão, transporte e deposição pelo gelo (fig. 3.8). Os depósitos glaciários são constituídos por elementos cuja granulometria varia desde o silte até blocos métricos (presentes nas moreias). Por seu lado, os depósitos fluvioglaciários sofreram a influência de processos fluviais posteriores à fusão dos gelos tendo daí resultado depósitos mais calibrados. Na Serra da Estrela, foram identificados por Vieira (2004) depósitos de moreia, *till* e depósitos fluvioglaciários.



Fig. 3.8. Unidades geológica na Nave de Santo António: depósitos aluvionares (a) e depósitos glaciários e fluvioglaciários (Q).

Rochas metassedimentares (Complexo Xisto-Grauváquico)

Formação de Rosmaninhal (R): Rochas metassedimentares de origem turbidítica, compostas por xistos, com raras intercalações de grauvaques. Na área estudada encontra-se, apenas, na base do flanco ocidental da montanha, nas imediações de Seia.

Rochas graníticas

Granito de Seia ($\gamma\pi g$): Granito de duas micas, predominantemente biotítico, porfiróide, de grão grosseiro. A mineralogia essencial é constituída por quartzo, microclina, albite-oligoclase, oligoclase-andesina, biotite e moscovite. Os minerais acessórios são a apatite, zircão, andaluzite, silimanite, minerais opacos de ferro, turmalina, anatase, xenótimo e granada. Os minerais secundários são a caulinite, sericite, clorite, moscovite, rútilo acicular, ilmenite, óxidos e hidróxidos de ferro, minerais do grupo do epídoto, esfena e leucoxena. Ocorre entre Unhais da Serra e Seia, e estende-se para noroeste até Gouveia (fig. 3.9).



Fig. 3.9. Granito de Seia.

Granito do Covão do Curral ($\gamma\Delta$): Granito biotítico, de grão fino e tendência porfiróide, com pequenos cristais de quartzo globulares rodeados de biotite. Ocorre a norte da Lagoa Comprida, perto da barragem do Covão do Curral. Próximo da barragem da Lagoa Comprida, este granito assume tonalidades avermelhadas devidas à epissienitização (fig. 3.10).



Fig. 3.10. Granito do Covão do Curral.

Granito da Estrela (γ_{mg}): Granito moscovítico de grão médio a grosseiro. Ocupa o cume da Serra da Estrela, ocorrendo nas imediações do Alto da Torre, e encontra-se rodeado pelo granito da Covilhã ao qual dá lugar, por vezes, gradualmente. A sua mineralogia é, essencialmente, constituída por quartzo, albite-oligoclase, microclina e moscovite. Os minerais acessórios são a apatite, o zircão, o rútilo e minerais opacos de ferro. Os minerais secundários são a caulinite, a sericite e a moscovite.

Granito do Curral do Vento ($\gamma_{m\pi}$): Granito de duas micas, grão médio e tendência porfíroide (com megacristais muito espaçados). A sua mineralogia essencial é constituída por quartzo, albite, microclina-pertite, microclina, biotite e moscovite. Como

minerais acessórios apresenta apatite, zircão, fluorite, rútilo, turmalina e minerais opacos de ferro. Os minerais secundários que podem ocorrer neste tipo de granito são a caulinite, a sericite, a clorite, o rútilo acicular e os produtos ferruginosos. Ocorre entre a Senhora da Boa Estrela, o Espinhaço de Cão e as Penhas da Saúde.

Granito de Manteigas (γm): Granito biotítico de grão médio. A mineralogia essencial é constituída por quartzo, oligóclase, albite, albite-oligóclase, microclina, biotite e moscovite. Apresenta como minerais acessórios magnetite, apatite, zircão, rútilo acicular, silimanite, andaluzite, granada, turmalina e fluorite, e como minerais secundários sericite, caulinite, clorite, rútilo acicular, esfena, óxidos e hidróxidos de ferro, leucoxena, clinozoisite e pirite, entre outros. Ocorre a sul e sudoeste de Manteigas podendo apresentar uma foliação marcada pela orientação da biotite.

Granito da Covilhã ($\gamma \pi m$): Granito de duas micas, porfiróide, de grão médio, composto por quartzo, oligóclase, biotite e moscovite (Ferreira *et al.*, 2000). Ocorre entre a Covilhã e a encosta ocidental de Seia, intercalado entre o Granito da Seia e o Granito da Estrela (fig. 3.11).



Fig. 3.11. Granito da Covilhã.

Em diversos locais, nomeadamente, nas imediações do Alto da Torre e na área envolvente da Nave de Santo António, é possível observar a ocorrência de *lajeação* do granito, fenómeno de diaclasamento sub-horizontal que ocorre por alívio de tensão pela erosão das rochas suprajacentes (fig. 3.12). Este tipo de fracturação tem importantes implicações hidrogeológicas, que serão discutidas nos capítulos 4 e 7.



Fig. 3.12. Granito da Estrela (note-se a ocorrência de lajeação).

Filões e massas

Filões de quartzo (q): Ocorrem, frequentemente, associados a falhas, podendo atingir centenas de metros de comprimento, ou como preenchimento de fraturas no granito ou rochas metassedimentares. Habitualmente são constituídos por quartzo leitoso, ferruginoso ou acinzentado, podendo conter massas e cristais de turmalina (fig. 3.13).



Fig. 3.13. Filão de quartzo.

Filões de rochas básicas (δ): Estas rochas correspondem a doleritos, normalmente, muito alterados e, em certos casos, com disjunção esferoidal (figura. 3.14). O filão dolerítico mais importante na área estudada encontra-se no Cântaro Magro (dolerito de grão médio, augítico e biotítico, com analcite) com direção, aproximadamente, E-W.

Filões aplíticos e pegmatíticos (γ_{ap}): São rochas de composição granítica, variando entre aplitos, de cor clara e ricos em moscovite, e pegmatitos (fig. 3.15).



Fig. 3.14. Filão dolerítico do Cântaro Magro.



Fig. 3.15. Filão aplítico.

3.2. Geomorfologia

3.2.1. Enquadramento geomorfológico regional

A Serra da Estrela, que constitui o segmento português da Cordilheira Central, evidencia-se do território de Portugal Continental circundante pela sua continuidade e marcado contraste morfológico (ex., O. Ribeiro, 1954; Daveau, 1969, 2004; Brum Ferreira, 1998). Esta região montanhosa, de orientação NE-SW, constitui uma elevação rodeada por diversas áreas aplanadas, tais como: a plataforma do Mondego, a noroeste, a Superfície da Meseta, a nordeste e a este, e a Cova da Beira, a sudoeste, (fig. 3.16 e 3.17). Encontra-se delimitada por encostas de declive acentuado, com desníveis de, aproximadamente, 1000 m no flanco sudeste e 1200 m no flanco noroeste. Atinge uma altitude máxima na Torre (1993 m), local situado próximo do extremo sudoeste do maciço, e vai decrescendo para noroeste (fig. 3.17 e 3.18).

A morfologia do maciço montanhoso da Serra da Estrela apresenta forte influência da atividade tectónica Alpina, da erosão fluvial e dos processos glaciários e periglaciários do Plistocénico Superior (e.g. Daveau, 1971; Brum Ferreira, 1998; Vieira, 2004). Os planaltos situados nos setores NW e a SE da montanha são limitados por escarpas de falha de traço retilíneo, com dezenas de quilómetros de extensão (Daveau, 1969, 1971, 2004). A secção meridional apresenta escarpas, induzidas pela ação da Falha de Bragança-Vilarica-Manteigas, que formam uma escadaria tectónica.

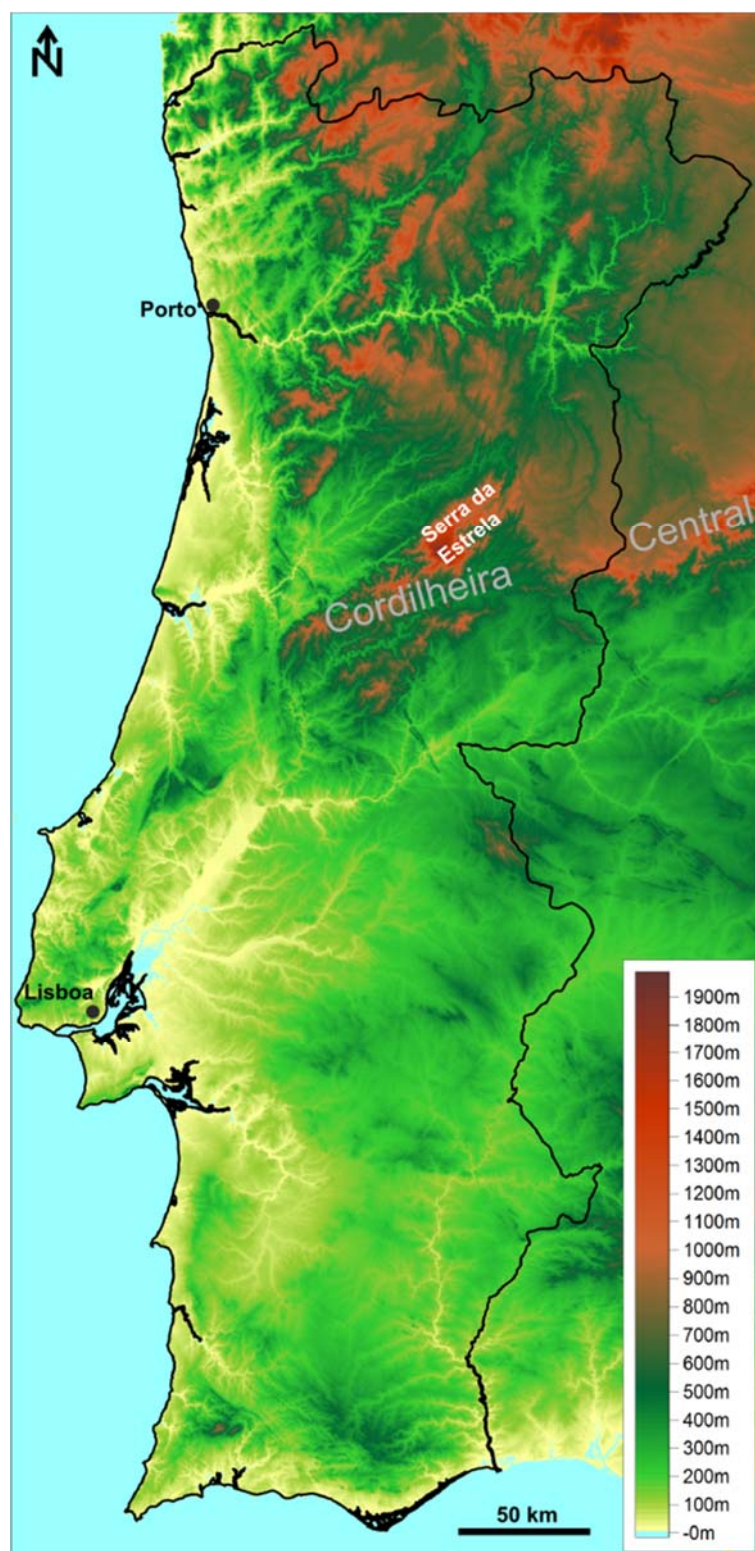


Fig. 3.16. Mapa hipsométrico de Portugal.

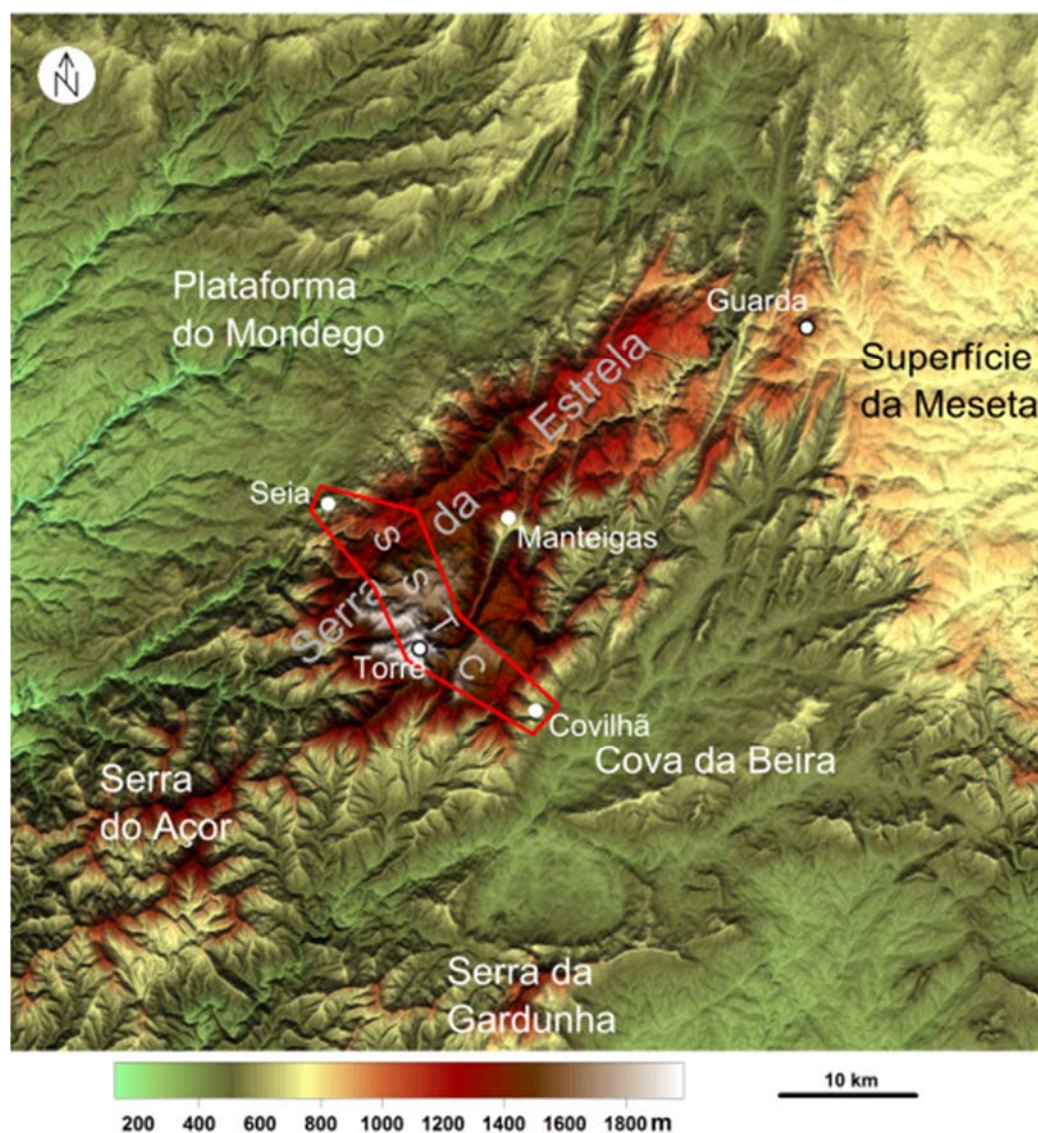


Fig. 3.17. Relevo da região da Serra da Estrela.

Outra característica do relevo deste maciço é devida à erosão diferencial entre as litologias metassedimentares e as graníticas (Lautensach, 1932). Desta forma, as áreas graníticas, mais resistentes à ação da erosão, apresentam altitude mais elevada e melhor conservação das escarpas e das superfícies de aplanção. Em contraposição, as zonas metassedimentares, de altitudes habitualmente inferiores, associadas a uma maior suscetibilidade à ação erosiva de uma densa rede de drenagem, apresentam uma geomorfologia monótona.

A atual rede de drenagem da Serra da Estrela sofreu readaptações consecutivas, explicativas da diversidade de geoformas associadas à erosão fluvial presente no maciço (Daveau, 2004). Originalmente, a rede de drenagem era do tipo transversal, com ligação à Meseta Ibérica. A este respeito, a autora Daveau distingue os vales do alto Mondego, com origem anterior à reativação dos acidentes tectónicos, de orientação NNE-SSW, dos altos vales do rio Zêzere, contemporâneos da ascensão do maciço.

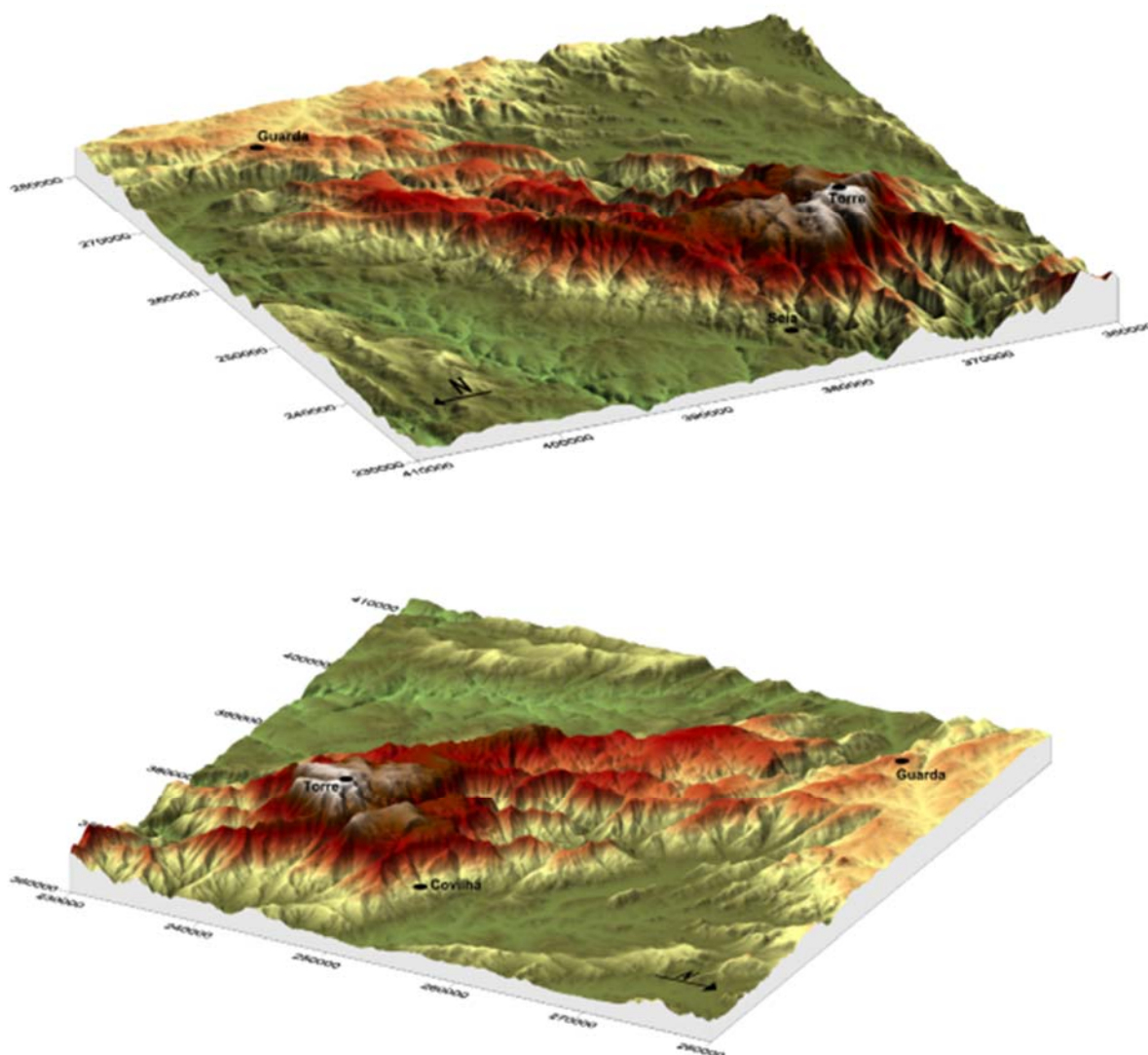


Fig. 3.18. Relevo da região da Serra da Estrela: vista de NW (em cima) e de NE (em baixo).

Como se referiu anteriormente, o relevo da Serra da Estrela, particularmente nas zonas de maior altitude, apresenta morfologia originada por processos glaciários e periglaciários (fig. 3.19), datados do Plistocénico Superior, à qual estão associados depósitos glaciários e fluvioglaciários (ex., Lautensach, 1929, 1932a; Daveau, 1971, 1973, 1978; Daveau *et al.*, 1997; Vieira & Ferreira, 1999; Vieira, 2004; Vieira *et al.*, 2005).

Relativamente à calote glacial de planalto, supõe-se que esta teria atingido uma área de 70 km² e uma espessura máxima de 80 m, especialmente acima dos 1650 m (Daveau, 1971). Da abóbada escorreriam, radialmente, diversas línguas glaciárias, sendo a mais vasta a do Zêzere, que atingiria, aproximadamente, 13 km de comprimento, 300 metros de espessura máxima e altitude mínima de 680 m. Vieira (2004), através de modelação matemática, calculou que a cúpula de gelo teria abrangido uma área de cerca de 66 km² e atingido uma altura máxima de gelo de 93 metros na bacia glaciária da Estrela e 344 m na bacia glaciária do rio Zêzere.

Vieira (2004) distinguiu um conjunto de fatores de grande importância hidrogeológica, com influência sobre a dinâmica geomorfológica atual dos altos vales e planaltos do maciço montanhoso. Concretamente, este autor indica o clima, as particularidades do relevo da montanha, a importância das heranças geomorfológicas na paisagem atual, a distribuição da vegetação e a influência antrópica.

Segundo o mesmo autor, é possível observar marcados contrastes entre os planaltos e as encostas envolventes no relevo atual. As fases mais frias do Plistocénico Superior são fonte de contraste no relevo atual devido à ação erosiva dos glaciares (fig. 3.19). Assim, verifica-se uma remoção quase total do rególito dos planaltos mais elevados, que originaram zonas com predomínio de afloramentos rochosos, quase desprovidas de solo e vegetação e com acumulação glaciária nas margens dos planaltos e nos vales (Daveau, 1971; Vieira, 2004; Vieira *et al.*, 2005).

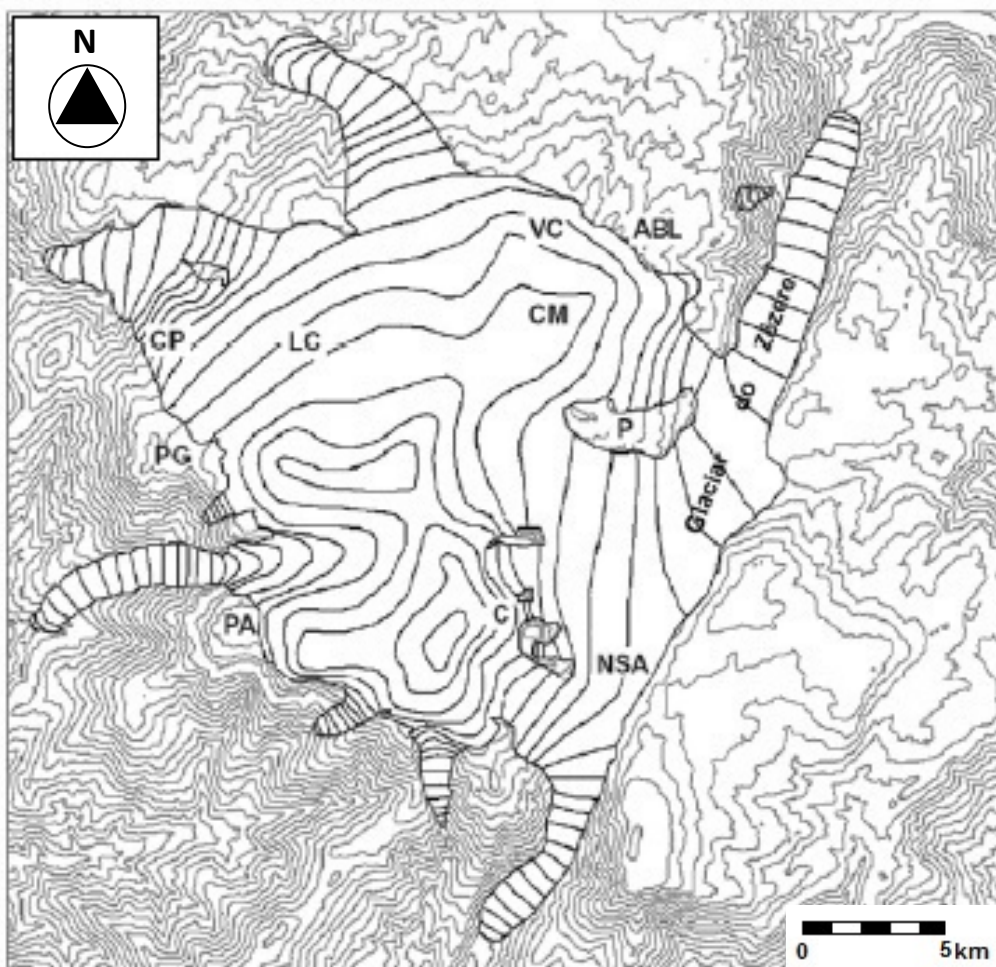


Fig. 3.19 - Esquema da topografia dos glaciares no Último Máximo da Glaciação. ABL – Alta Barroca das Lameiras; C – Cântaros; CM – Curral do Martins; CP – Cabeço do Picoto; LC – Lagoa Comprida; NSA – Nave de Santo António; P – Piornal; PA – Penha dos Abutres; PG – Penha do Gato; VC – Vale do Conde (adaptado de Vieira, 2004).

3.2.2. Enquadramento geomorfológico local

O setor de Seia-Torre-Covilhã, tem orientação geral NW-SE, aproximadamente, perpendicular à orientação dos vales do rio Zêzere e da ribeira de Alforfa, e apresenta uma morfologia cuja altitude varia entre 1993 m, na Torre, e 565 m, nas imediações de Seia, na base da vertente ocidental do maciço montanhoso (figs. 3.20 a 3.22). O referido setor abrange as seguintes áreas:

- o flanco oriental da Serra da Estrela, entre a Covilhã e as Penhas da Saúde;
- a área planáltica situada entre o Alto da Pedrice e os Piornos;
- a portela da Nave de Santo António e as zonas adjacentes do vale do Zêzere e do vale da Ribeira da Alforfa;
- a encosta situada entre a Nave de Santo António e o Covão do Boi, incluindo as encostas adjacentes ao Cântaro Magro;
- o planalto circundante da Torre, entre o Covão do Boi e a Lagoa Comprida;
- o flanco ocidental da Serra da Estrela, entre a Lagoa Comprida, a aldeia do Sabugueiro e Seia.

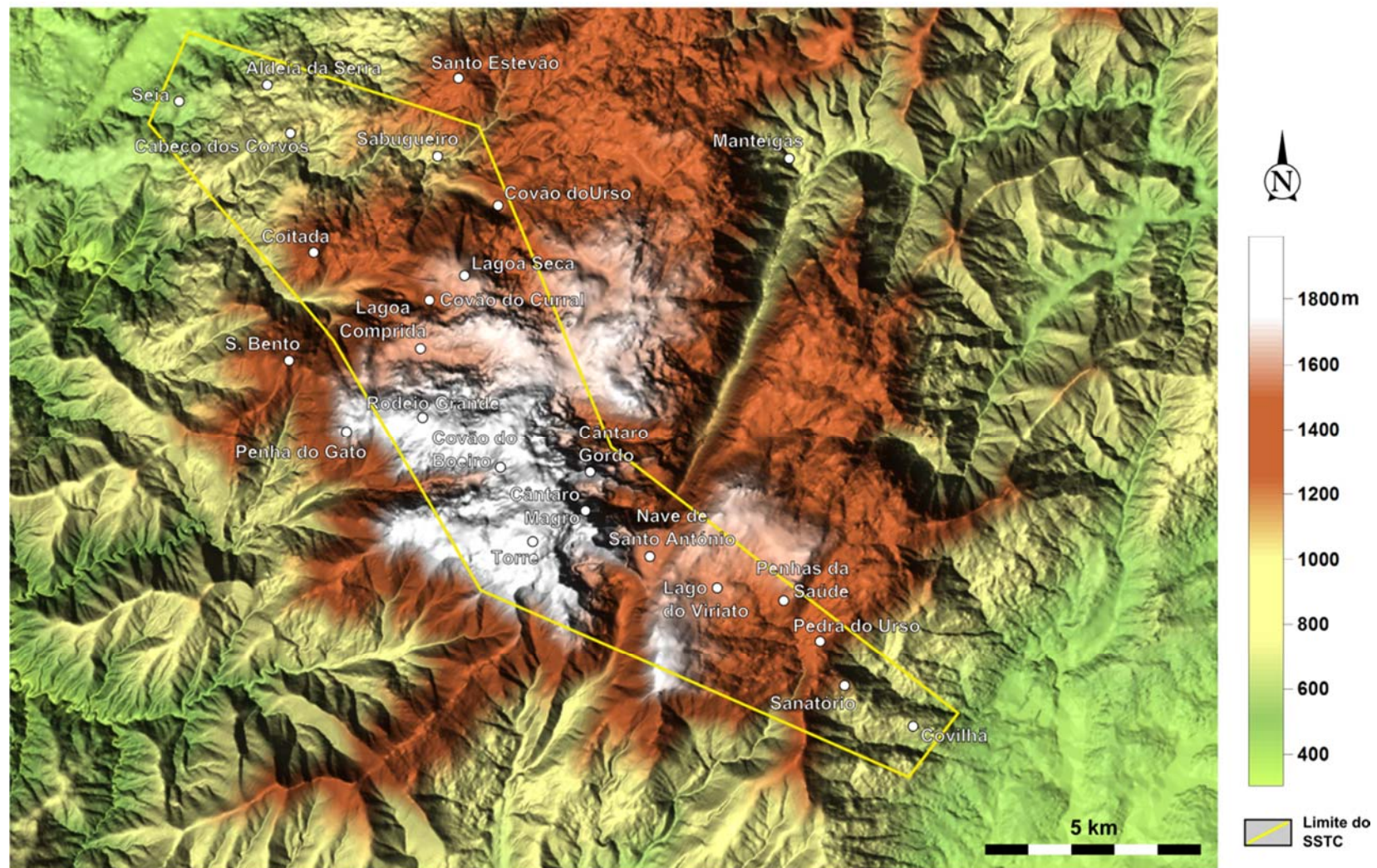


Fig. 3.20. Topografia do setor de Seia-Torre-Covilhã .

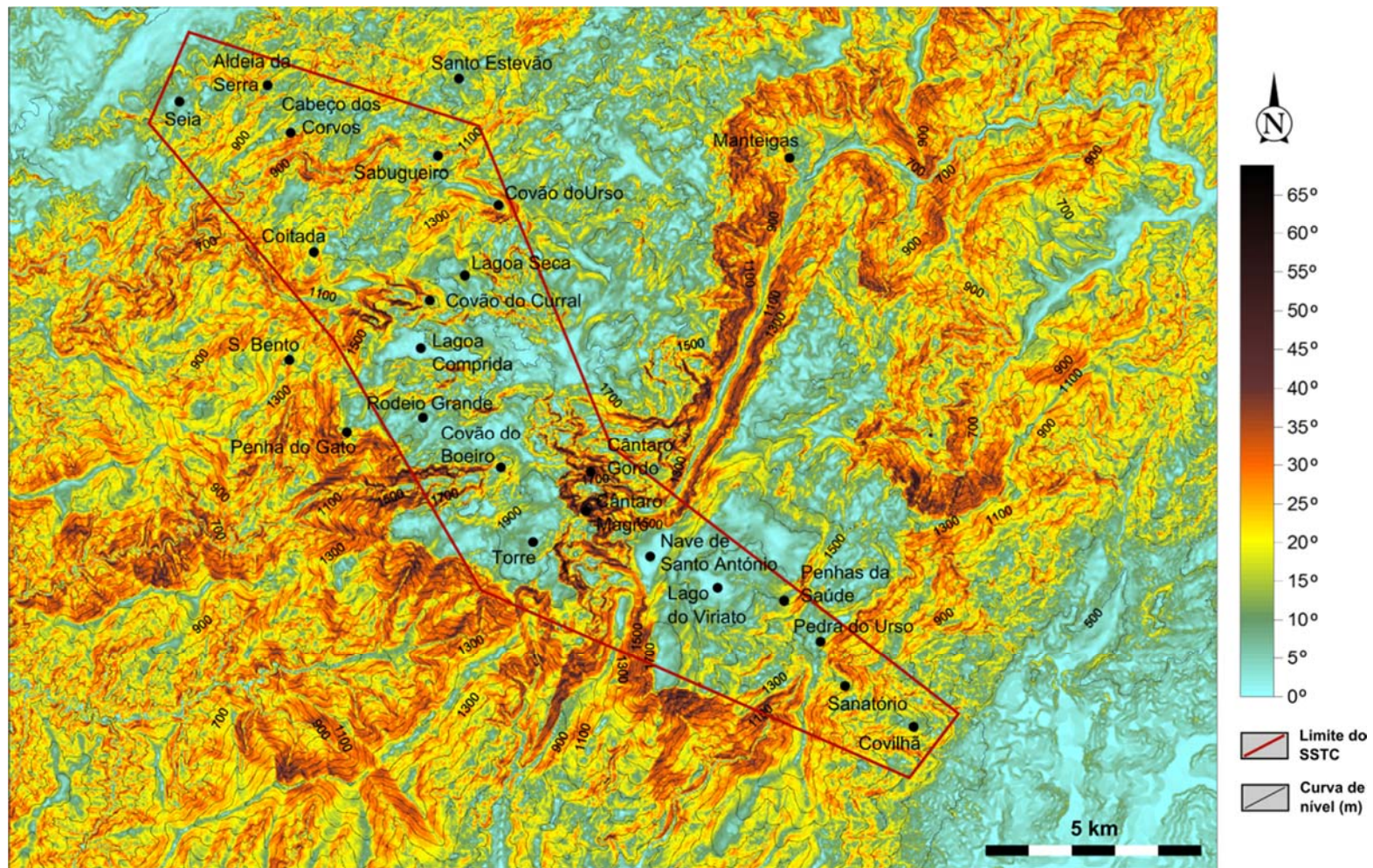


Fig. 3.21. Mapa de declives do setor de Seia-Torre-Covilhã.

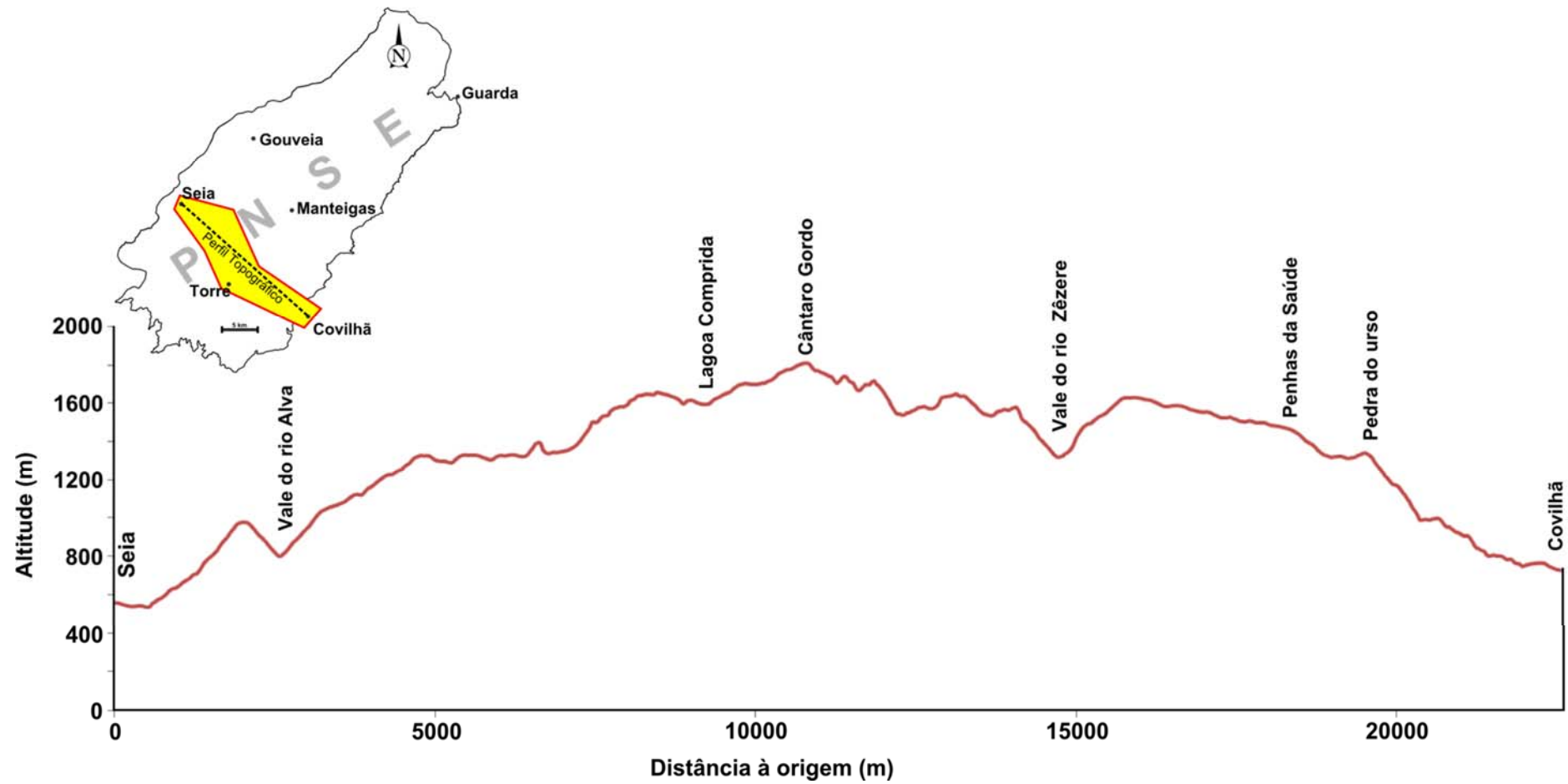


Fig. 3.22. Perfil topográfico do setor de Seia-Torre-Covilhã.

3.3. Climatologia

3.3.1. Enquadramento climatológico regional

Sob o ponto de vista climático, Portugal Continental localiza-se no limite meridional da zona temperada norte, mais concretamente, entre o anticiclone dos Açores e a zona das depressões subpolares. Os traços climáticos de Portugal Continental são condicionados por fatores como a latitude, a distância ao oceano e características do relevo tais como a orientação e altitude das regiões de montanha (ex. Lautensach, 1932b ; Ribeiro *et al.*, 1994; Daveau, 1985; Miranda *et al.*, 2006; IM & AEM, 2011).

Por ação dos referidos fatores, a influência atlântica é mais marcada no noroeste do território, existindo, a sul, uma influência mediterrânea acentuada. Além disso, verifica-se que o interior exhibe um clima de carácter mais continental do que o litoral (Mora, 2006; IM & AEM, 2011).

A distribuição espacial da precipitação e da temperatura média do ar é fortemente influenciada pelos maciços montanhosos do norte e centro do país, os quais (ex. Daveau, 1985) apresentam características climáticas particulares e funcionam como condicionantes climáticos para as áreas envolventes. O maciço montanhoso da Serra da Estrela situa-se numa zona de transição climática (quer entre o norte e o sul, quer entre o litoral e o interior do território) e funciona como barreira orográfica à circulação de massas de ar húmidas oriundas do Atlântico, conduzindo a uma menor ocorrência de precipitação média anual na região interior.

As Normais Climatológicas são, segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM), contagens estatísticas dos valores médios dos vários elementos climáticos num período de 30 anos (Arguez & Vose, 2011). Os resultados das normais

climatológicas 1971-2000, as mais recentes disponibilizadas pelo Instituto de Meteorologia, agregam informação de 21 estações meteorológicas instaladas em Portugal Continental. Nelas estão contidos, entre outros, os valores médios da temperatura máxima e mínima do ar e os totais de precipitação.

Os Boletins Climatológicos Anuais para os anos de 2010, 2011 e 2012, produzidos pelo Instituto de Meteorologia, I.P., atual Instituto Português do Mar e da Atmosfera, revelam que os anos de 2010 e 2011 foram marcados por valores médios da temperatura máxima, mínima e média do ar superiores aos valores normais médios calculados a partir de uma série de 30 anos, período 1971-2000, em Portugal Continental (Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2010-2012). No entanto, em 2012, os valores médios da temperatura máxima, mínima e média foram muito próximos dos normais.

Relativamente aos valores anuais de precipitação, em Portugal Continental, verifica-se que o ano de 2010 apresenta uma tendência antagónica relativamente aos anos de 2011 e 2012. Assim, enquanto que, no ano de 2010, a precipitação foi superior ao valor normal do período 1971-2000 — tendo, mesmo, sido o ano mais chuvoso da década 2001-2010 com 1063mm/ano — nos anos de 2011 e 2012 registou-se um decréscimo de precipitação face ao valor normal, registando-se uma variação negativa de 136,6 mm e 246,1 mm respetivamente.

O mapa da figura 3.23b realça o efeito de barreira climática da Serra da Estrela. Com efeito, na região entre a orla costeira e o maciço montanhoso, os valores totais para a precipitação no ano de 2010, atingem o máximo de 1400 mm, ao passo que, na zona a este do maciço os valores não ultrapassam 1200 mm. Além do referido, observando o mapa de precipitação total anual de 2010, com base nas normais 1971-2000 (fig. 3.23a), verifica-se que os valores percentuais para o ano de 2010, na região do maciço montanhoso, assim como para maioria o território continental, se encontra

cerca de 140 pontos percentuais acima dos valores normais. Já em relação ao ano de 2012 (fig. 3.23c) verifica-se que a precipitação total apresenta um valor de, apenas, 75% do normal.

A distribuição espacial da temperatura do ar, é condicionada pela latitude, pela proximidade à costa e pela altitude (ex., Daveau, 1985; Ventura, 1988), conforme se pode observar na figura 3.24. Contudo, a influência destes fatores não é regular ao longo do ciclo anual, assim, verifica-se um gradiente térmico de Norte para Sul durante o Inverno e, na faixa costeira, durante o Verão (Miranda *et al.*, 2006).

Por outro lado, a distribuição espacial da temperatura do ar é influenciada pelas regiões montanhosas, especialmente através do efeito de barreira e de altitude, de onde resultam diferenças consideráveis entre litoral e interior.

Com base no mapa da figura 2.24 b. é possível observar uma variação do gradiente térmico de Norte para Sul. Pode-se também observar que, à medida que a altitude aumenta, o valor de temperatura do ar diminui. Esse efeito é bem visível no maciço montanhoso da Serra da Estrela, que apresenta valores médios da temperatura do ar nitidamente inferiores ao restante território. Verifica-se, também, que a temperatura média do ar na zona da Serra da Estrela apresenta um aumento, entre 0,5°C e 1°C, no ano de 2010, em relação ao valor normal do período de 1971-2000, enquanto que, para o ano de 2012, a temperatura média do ar na Serra da Estrela é, sensivelmente, idêntica à do período de 1971-2000 (figura 3.24 a e c).

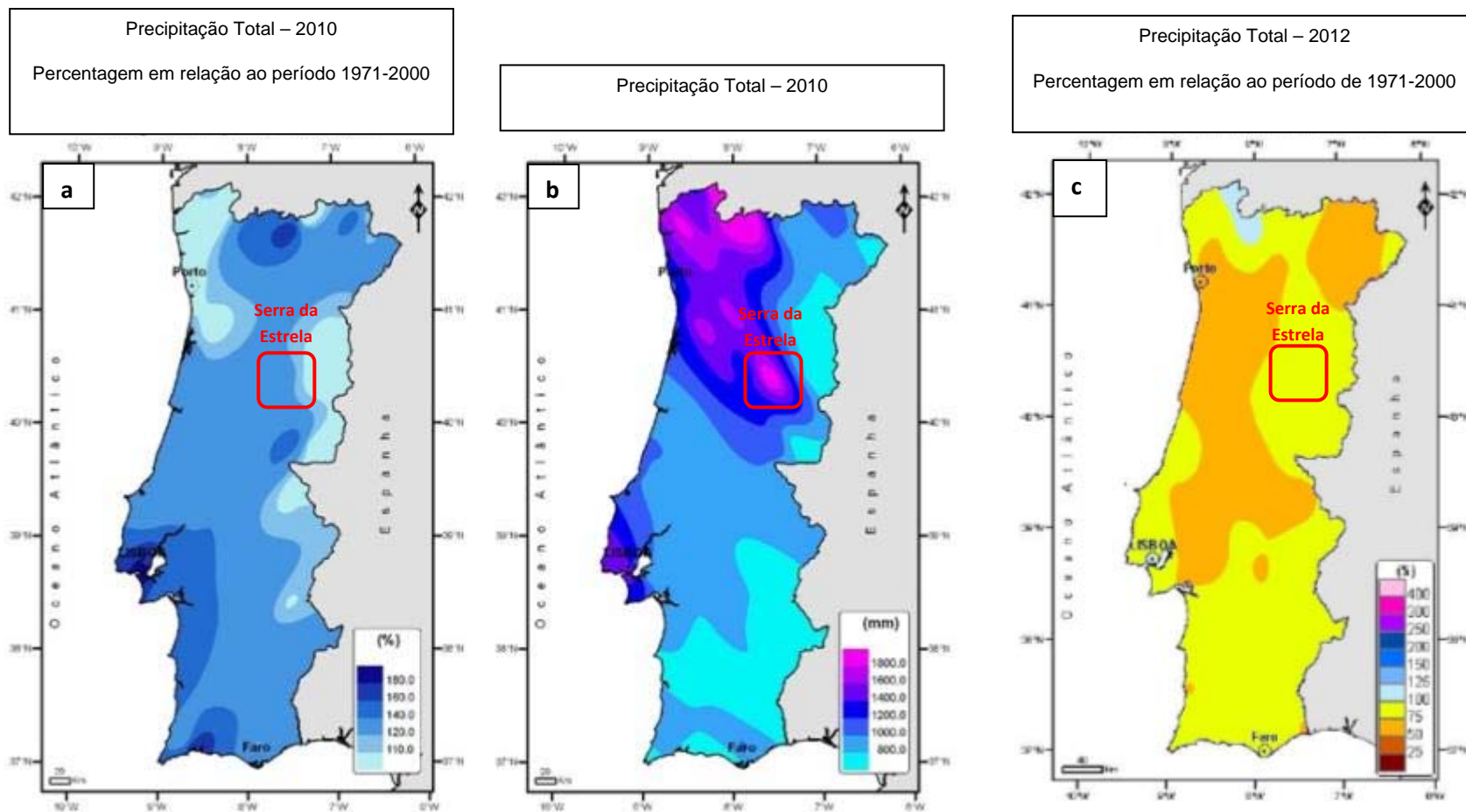


Fig. 3.23. a. Distribuição espacial dos valores totais de precipitação, em percentagem, em relação ao período 1971-2000 para o ano de 2010 em Portugal Continental; b. Distribuição espacial dos valores totais de precipitação em Portugal Continental (mm) em relação ao período de 1971-2000 para o ano de 2010; c. Distribuição espacial dos valores totais de precipitação em Portugal Continental respeitantes à percentagem em relação ao período de 1971-2000 e ao ano 2010 (modificado de Instituto Português do Mar e da Atmosfera 2012).

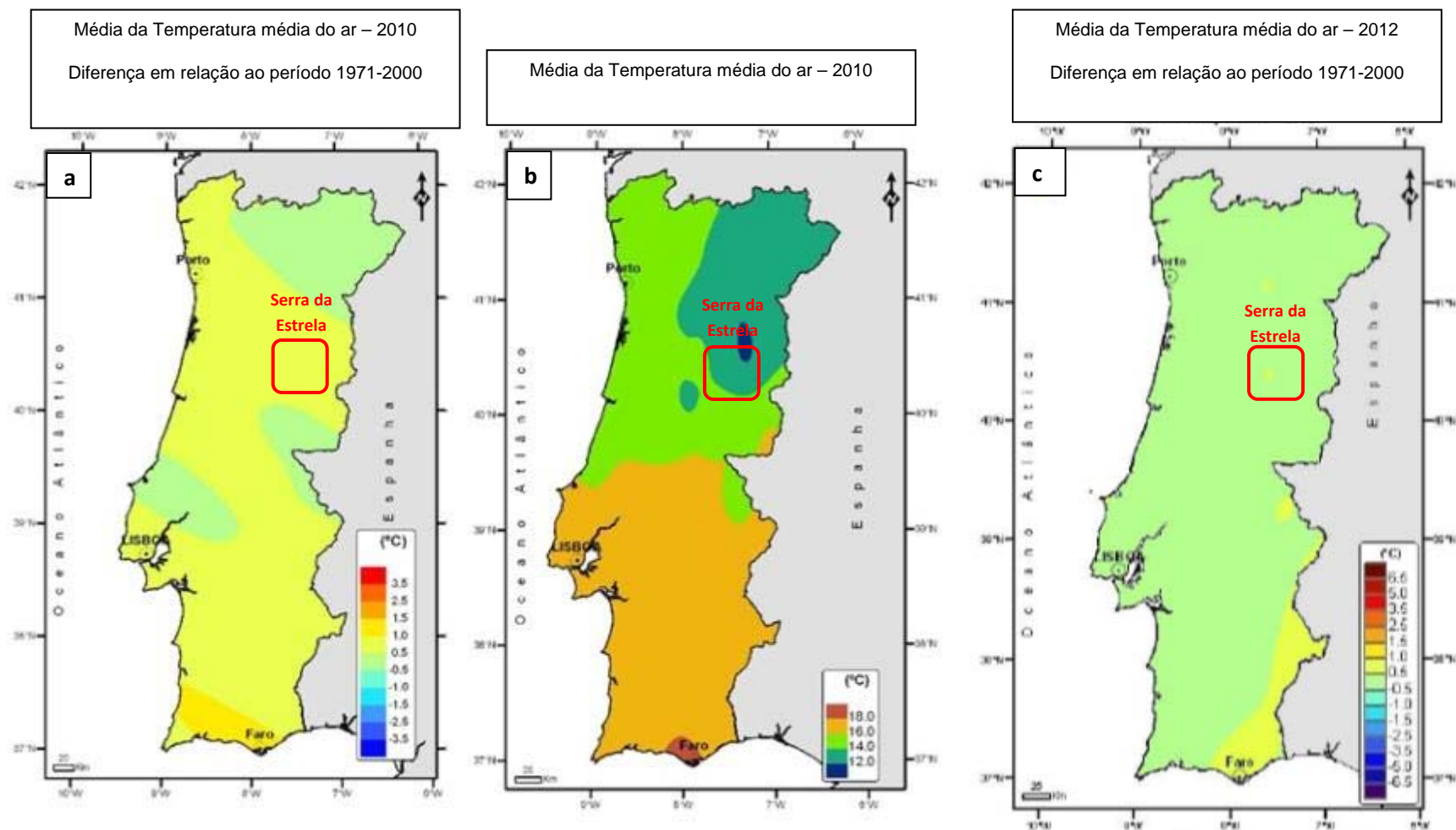


Fig. 3.24. a. Distribuição espacial das diferenças da média da temperatura média diária do ar entre 2010 e o período de 1971-2000 em Portugal Continental; b. Distribuição da temperatura média diária do ar para o ano de 2010 em Portugal Continental ; c. Distribuição espacial das diferenças da média da temperatura média diária do ar entre 2010 e o período de 1971-2000 em Portugal Continental (modificado de Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2012).

O clima de Portugal Continental foi classificado, utilizando o método de Köppen-Geiger, com base nos resultados das normais climatológicas de 1971-2000 (Instituto de Meteorologia, 2011; IM & AEM, 2011) (fig. 3.25).

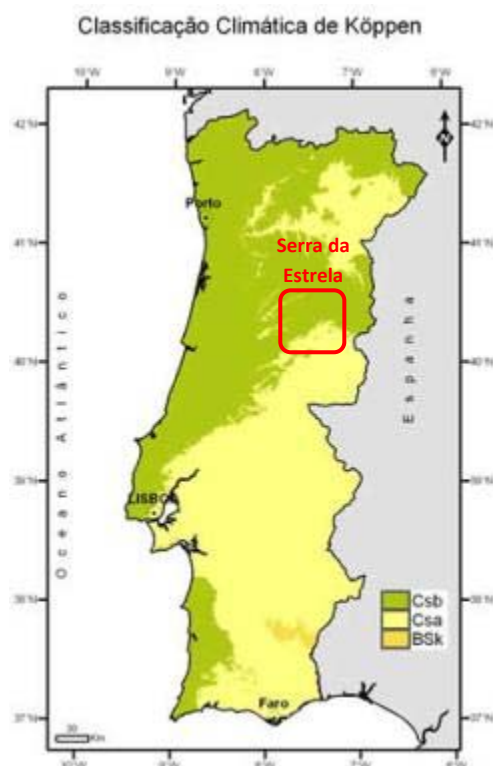


Fig. 3.25. Tipos de clima de Portugal Continental segundo a classificação de Köppen-Geiger (Fonte: Instituto de Meteorologia, I. P. 2011).

Conforme se pode verificar na figura 3.25, no território de Portugal Continental ocorrem dois tipos de clima distintos: o clima Temperado e o clima Árido. O clima Temperado, do Tipo C, Subtipo Cs (Clima temperado com Verão seco), ocorre nas variedades Csa – clima temperado com Verão quente e seco – presente nas regiões interiores do vale do Douro e em certas áreas a sul do sistema montanhoso Montejunto-Estrela, e Csb – clima temperado com Verão seco e suave – característico de quase toda a região a norte do sistema montanhoso Montejunto-Estrela e nas regiões do litoral oeste alentejano e algarvio. O Clima Árido, Tipo B, subtipo BS, variedade BSk – clima de estepe fria de latitude média, ocorre apenas numa pequena região do Baixo Alentejo. Através desta classificação, verifica-se que a região da Serra

da Estrela se encontra na transição entre o clima do tipo CSa e o clima do tipo CSb, sendo possível, novamente, salientar a importância deste maciço montanhoso como barreira climática.

Por seu lado, Daveau *et al.* (1985) propuseram uma classificação climática de Portugal a qual destaca a individualidade climática dos maciços montanhosos (figura 3.26). Assim a Cordilheira Central (que inclui as Serras da Estrela, da Lousã e do Açor), é incluída na classe dos “maciços de clima diferenciado”, os quais possuem clima de características análogas ao das regiões circundantes, mas de feição mais atlântica.

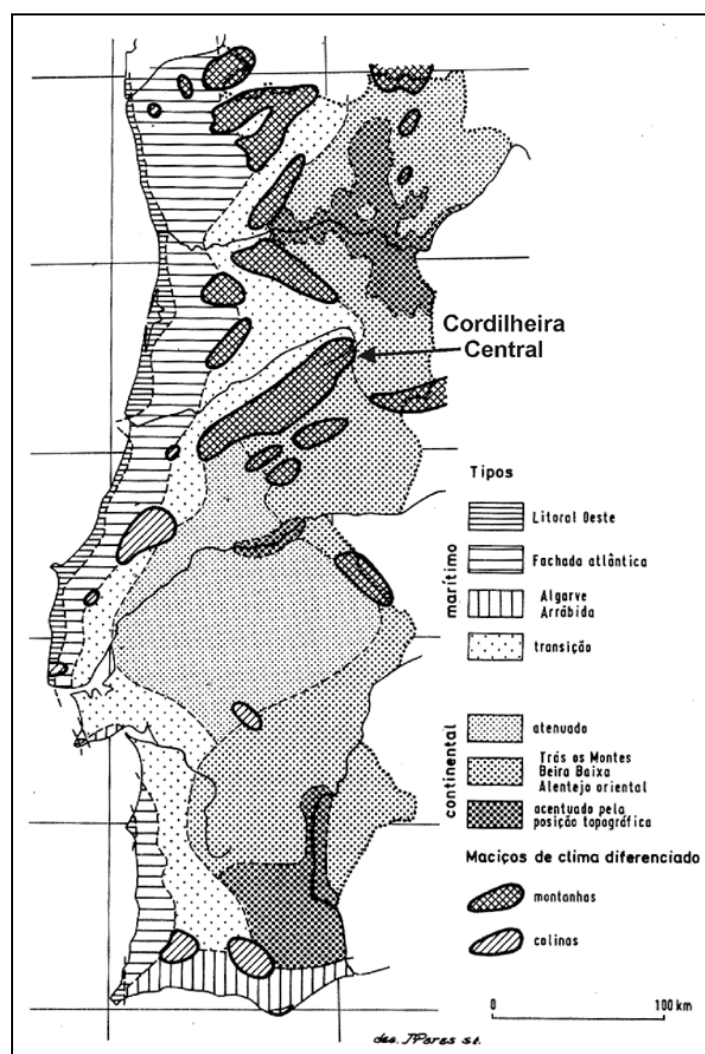


Fig. 3.26. Regiões climáticas de Portugal Continental (adaptado de Daveau, 1985).

As características climáticas das zonas de montanha são fortemente influenciadas por fatores geográficos. Mais especificamente, a influência da latitude da Serra da Estrela, está presente na variação da radiação solar incidente ao longo do ano, tanto pelo número de horas de exposição como pela altura do sol (Mora, 2006). Assim, a exposição solar e o declive, explicam a distribuição espacial da radiação solar incidente na superfície e, indiretamente, da temperatura máxima registada.

Para além de influenciar, indiretamente, a temperatura, a latitude determina também a exposição aos ventos regionais. A Serra da Estrela está exposta à circulação dominante de oeste, ficando sob influência do ar relativamente estável com origem nos anticiclones subtropicais (Alcoforado, 1993; Ferreira, 2005). Este fluxo dominante de oeste, ao encontrar a Serra da Estrela, é perturbado podendo provocar precipitação.

De acordo com Mora (2006), os climas de montanha são determinados pela quantidade de calor que as vertentes recebem e pelas correntes de compensação que daí resultam. A Serra da Estrela encontra-se na transição entre o Atlântico, que domina no flanco Oeste, e o Mediterrâneo, no flanco Este e nos vales interiores. A sua dissimetria climática é determinada pelo período seco e pela precipitação. Assim, na fachada Este verifica-se precipitação mais intensa e concentrada no tempo, ao passo que na fachada Oeste a precipitação ocorre num maior número de dias mas com menor intensidade. Já a dissimetria na distribuição da temperatura deve-se às características do relevo, que controlam a divergência e convergência das massas de ar; mas também aos fluxos regionais mais frequentes, particularmente os fluxos de SW e de NW. De acordo com a mesma autora, o relevo influencia o rumo dos ventos registados em todas as estações meteorológicas dos planaltos da Serra da Estrela. Em todas as estações dominam os ventos de Sudeste, de fraca intensidade, incidentes sobretudo nos meses de Verão. No Inverno, registam-se ventos com maior velocidade e com rumos de Oeste e de Nordeste.

3.3.2. Enquadramento climatológico local

Tal como se referiu na secção anterior, a distribuição espacial da precipitação e da temperatura média do ar no sector Seia-Torre-Covilhã é condicionada pelas características morfológicas da região como a altitude, o relevo e a orientação das encostas (ex. Daveau *et al.*, 1977; Vieira, 2004; Mora, 2006).

Com efeito, segundo estes autores, a ocorrência de precipitação parece ser condicionada pela altitude e pela orientação da montanha em relação aos fluxos dominantes das massas de ar. À escala regional verifica-se um aumento da precipitação sob a forma de neve com aumento da altitude (quadro 3.1). Contudo, à escala local, a ação de mecanismos de convergência e divergência dos fluxos das massas de ar, torna a interpretação da distribuição espacial de precipitação bastante difícil. Este facto pode explicar as exceções locais à tendência regional de aumento da ocorrência de precipitação sob a forma de neve com a altitude, com destaque para o caso das Penhas da Saúde (1510 m de altitude), onde se registam valores do número de dias com queda de neve menores do que para as Penhas Douradas (1383 m) – ver quadro 3.1. Mas, para além destes fatores, também a exposição ao fluxo de massas de ar pluviogénicas assume um papel determinante na distribuição espacial da precipitação (Mora, 2006).

Relativamente à temperatura média do ar, os valores registados nas estações meteorológicas das Penhas Douradas, Lagoa Comprida e Penhas da Saúde, revelam um regime térmico simples, Vieira & Mora (1998). De acordo com os registos do quadro 3.3 verifica-se que, para as referidas estações meteorológicas, o mês mais quente é Julho e o mais frio é Fevereiro. A figura 3.27 permite observar que a temperatura média anual nos planaltos da região ronda os 6 a 10°C e que nas imediações da Torre ronda os 4 a 6°C.

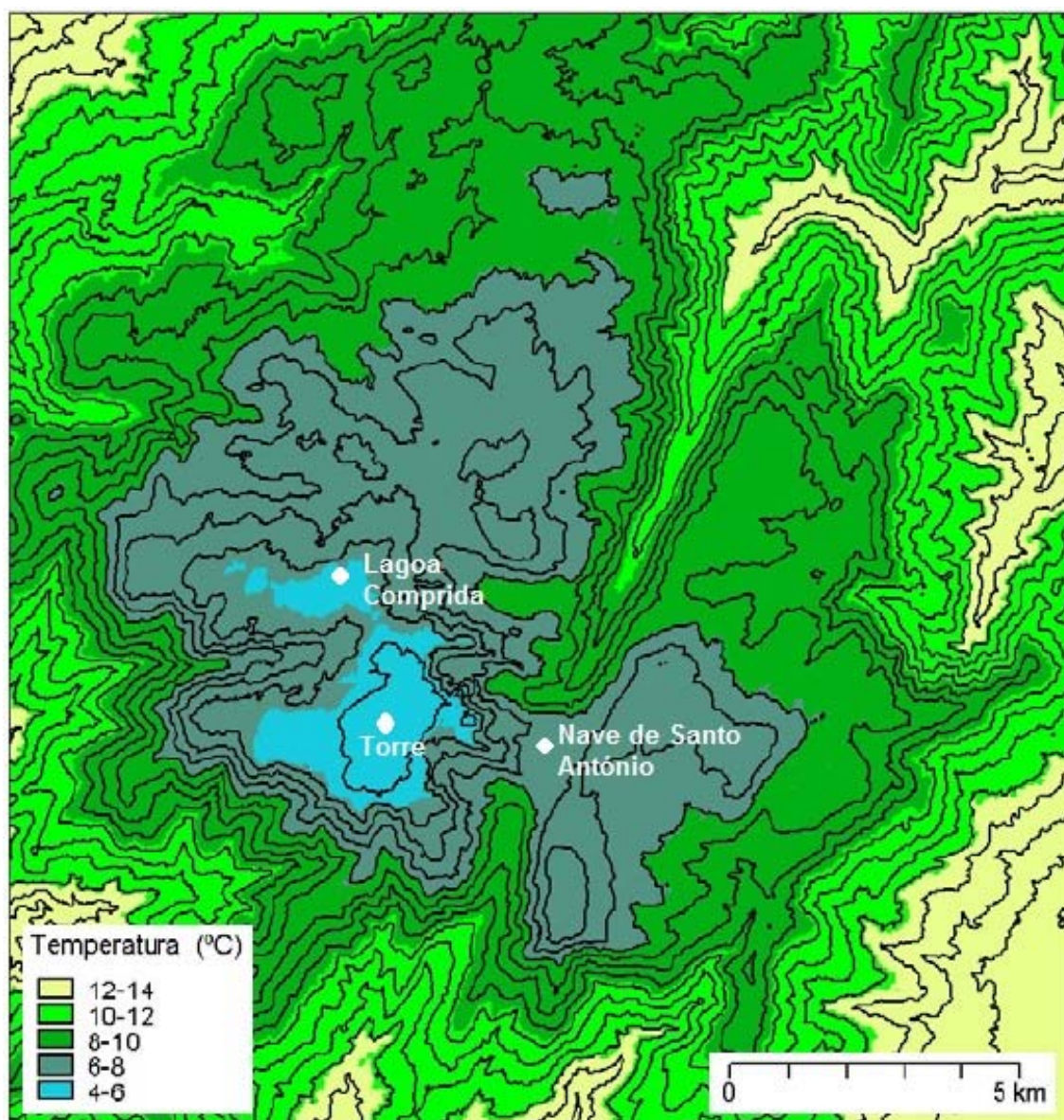


Fig. 3.27. Distribuição espacial da temperatura média anual do ar (extraído de Mora, 2006).

A quantidade e qualidade da informação existente acerca da queda de neve é reduzida, contudo, dada a sua importância para o presente estudo hidrológico importa referi-la. Assim, o quadro 3.1. representa a distribuição mensal do número de dias com precipitação, com queda de neve e de solo coberto de neve em estações meteorológicas da Serra da Estrela correspondentes às normais de 1951-1980 (INMG, 1991).

Quadro 3.1. Distribuição mensal do número de dias com precipitação, queda de neve e solo coberto de neve nas estações meteorológicas da região da Serra da Estrela (valores normais do período 1951-1980); extraído de INMG (1991).

	Covilhã			Penhas da Saúde			Lagoa Comprida			Seia			Penhas Douradas		
Altitude	738 m			1510 m			1560 m			515 m			1383 m		
EC ^(*)	P≥0,1mm	QN	SCN	P≥0,1mm	QN	SCN	P≥0,1mm	QN	SCN	P≥0,1mm	QN	SCN	P≥0,1mm	QN	SCN
Jan.	14,0	s. i.	s. i.	15,0	5,8	10,2	15,3	6,6	13,2	12,0	s. i.	s. i.	17,0	6,4	13,7
Fev.	13,0	s. i.	s. i.	13,7	6,9	10,8	14,6	8,6	14,0	11,0	s. i.	s. i.	15,9	7,7	14,7
Mar.	13,0	s. i.	s. i.	14,1	4,9	7,9	15,8	9,0	11,9	12,0	s. i.	s. i.	16,6	6,1	11,7
Abr.	10,0	s. i.	s. i.	11,6	2,5	2,2	12,3	4,7	4,8	10,0	s. i.	s. i.	13,9	3,3	3,0
Mai.	10,0	s. i.	s. i.	10,3	0,6	0,6	11,9	2,1	1,1	9,0	s. i.	s. i.	12,6	1,3	1,1
Jun.	6,0	s. i.	s. i.	7,8	0,1	0,0	9,2	0,2	0,0	7,0	s. i.	s. i.	9,7	0,0	0,0
Jul.	2,0	s. i.	s. i.	3,2	0,0	0,0	3,5	0,0	0,0	2,0	s. i.	s. i.	4,2	0,0	0,0
Ago.	2,0	s. i.	s. i.	2,6	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	2,0	s. i.	s. i.	4,8	0,0	0,0
Set.	5,0	s. i.	s. i.	6,5	0,0	0,0	7,7	0,1	0,0	5,0	s. i.	s. i.	8,5	0,0	0,0
Out.	10,0	s. i.	s. i.	11,2	0,5	0,0	12,4	0,9	0,0	4,0	s. i.	s. i.	13,1	0,4	0,2
Nov.	12,0	s. i.	s. i.	12,6	2,4	1,8	14,6	3,6	4,6	5,0	s. i.	s. i.	15,1	2,9	2,3
Dez.	12,0	s. i.	s. i.	12,9	4,4	7,1	13,5	5,5	11,0	5,0	s. i.	s. i.	15,1	5,1	9,4
Ano	109	s. i.	s. i.	121,5	28,1	40,6	134,5	41,3	60,6	41	s. i.	s. i.	146,5	33,2	56,1

Nota: s. i. Sem informação.

(*) EC: elemento climático. P: precipitação. QN: queda de neve. SCN: solo coberto de neve.

No decorrer dos trabalhos de investigação do presente estudo, nos anos de 2010, 2011 e 2012, a média da temperatura máxima registada nas Penhas Douradas foi de 12,89°C, sendo a média da temperatura mínima ocorrida, para o período de estudo de 5,58°C, apresentando-se ambos os valores bastante próximos dos normais para o período 1971-2000 (quadro 3.2).

Quadro 3.2. Resumo climatológico para o período de 2010-2012 na estação das Penhas Douradas (valores normais do período 1951-1980); extraído de INMG (1991).

	Média da temperatura máxima (°C)		Média da temperatura mínima (°C)		Precipitação total (mm)	
	Valor medido	Valor normal ⁽¹⁾	Valor medido	Valor normal ⁽¹⁾	Valor medido	Valor normal ⁽¹⁾
Maio 2010	13,2	12,8	5,3	5,3	53,4	129,7
Setembro 2010	*	18,9	*	10,7	*	62,8
Dezembro 2010	5,9	6,9	0,0	1,4	273,4	257,2
Abril 2011	15,29	9,6	7,37	2,4	153,2	141,7
Junho 2011	20,18 ⁽²⁾	18,1	9,0 ⁽²⁾	9,6	0,5	69,3
Setembro 2011	20,37	18,93	11,33	10,68	72,1	62,8
Dezembro 2011	8,55	6,86	2,30	1,39	95,0	257,2
Julho 2012	22,12	22,17	12,39	12,87	4,2	25,9
Valor médio de 2010	12,59	12,83	5,85	5,63	2203,2 ⁽⁴⁾	1584,6
Valor médio de 2011⁽³⁾	12,50	12,83	5,04	5,63	3967,2 ⁽⁴⁾	1584,6
Valor médio de 2012	13,57	12,83	5,86	5,63	1207 ⁽⁴⁾	1584,6

* Ausência de dados devido a avaria.

⁽¹⁾ Valores referentes à normal climatológica de 1971-2000.

⁽²⁾ Valores apurados com existência de algumas falhas de valores diários durante o mês.

⁽³⁾ Cálculo realizado a partir da média entre os valores sazonais de primavera, outono e inverno – valores indisponíveis para a estação de verão.

⁽⁴⁾ Cálculo realizado a partir da soma da precipitação total mensal.

O quadro 3.3. representa a distribuição da precipitação total e da temperatura média do ar nas estações meteorológicas da encosta oriental – Covilhã e Penhas da Saúde – e da encosta ocidental – Lagoa Comprida, Seia e Penhas Douradas. É de notar que as estações localizadas na encosta oriental, sobretudo a estação das Penhas da Saúde, registam valores de precipitação geralmente superiores quando comparadas com as estações da encosta ocidental (fig. 3.28). Relativamente à temperatura, dado não se encontrarem disponíveis os dados relativos à temperatura média mensal para as estações da Covilhã e Seia, não é possível a observação de diferenças entre as duas encostas (fig. 3.29).

Quadro 3.3. Distribuição mensal da precipitação total e da temperatura média do ar em estações meteorológicas da região da Serra da Estrela (valores normais do período 1951-1980); extraído de INMG (1991).

	Covilhã		Penhas da Saúde		Lagoa Comprida		Seia		Penhas Douradas	
Altitude	738m		1510m		1560m		515m		1383m	
EC	P (mm)	T (C°)	P (mm)	T (C°)	P (mm)	T (C°)	P (mm)	T (C°)	P (mm)	T (C°)
Jan.	274,9	s. i.	436,3	1,3	239,6	1,8	168,3	s. i.	255,7	2,7
Fev.	244,9	s. i.	367,5	1,2	219,3	1,4	160,1	s. i.	234,3	2,7
Mar.	198,1	s. i.	336,9	2,7	204,8	2,7	137,8	s. i.	200,9	4,2
Abr.	113,5	s. i.	223,4	4,7	137,3	4,4	90,1	s. i.	128,1	6,1
Mai.	105,4	s. i.	222,4	8,3	142,5	7,8	85,6	s. i.	117,8	9,6
Jun.	46,0	s. i.	119,7	12,0	89,1	11,6	63,0	s. i.	75,6	13,4
Jul.	14,7	s. i.	27,8	15,8	23,4	15,3	16,8	s. i.	23,9	17,0
Ago.	14,5	s. i.	30,6	15,7	27,2	15,0	17,5	s. i.	23,3	16,8
Set.	52,7	s. i.	110,9	12,8	80,4	12,6	49,3	s. i.	68,0	14,4
Out.	155,7	s. i.	306,7	8,2	199,9	8,4	102,3	s. i.	180,3	9,8
Nov.	217,1	s. i.	391,3	4,2	242,7	4,5	140,3	s. i.	238,7	5,4
Dez.	224,6	s. i.	391,5	2,3	219,6	2,5	142,0	s. i.	252,6	3,4
Ano	1661,1	s. i.	2965,0	7,4	1825,8	7,4	1173,1	s. i.	1799,2	8,8

Nota: s. i. Sem informação.

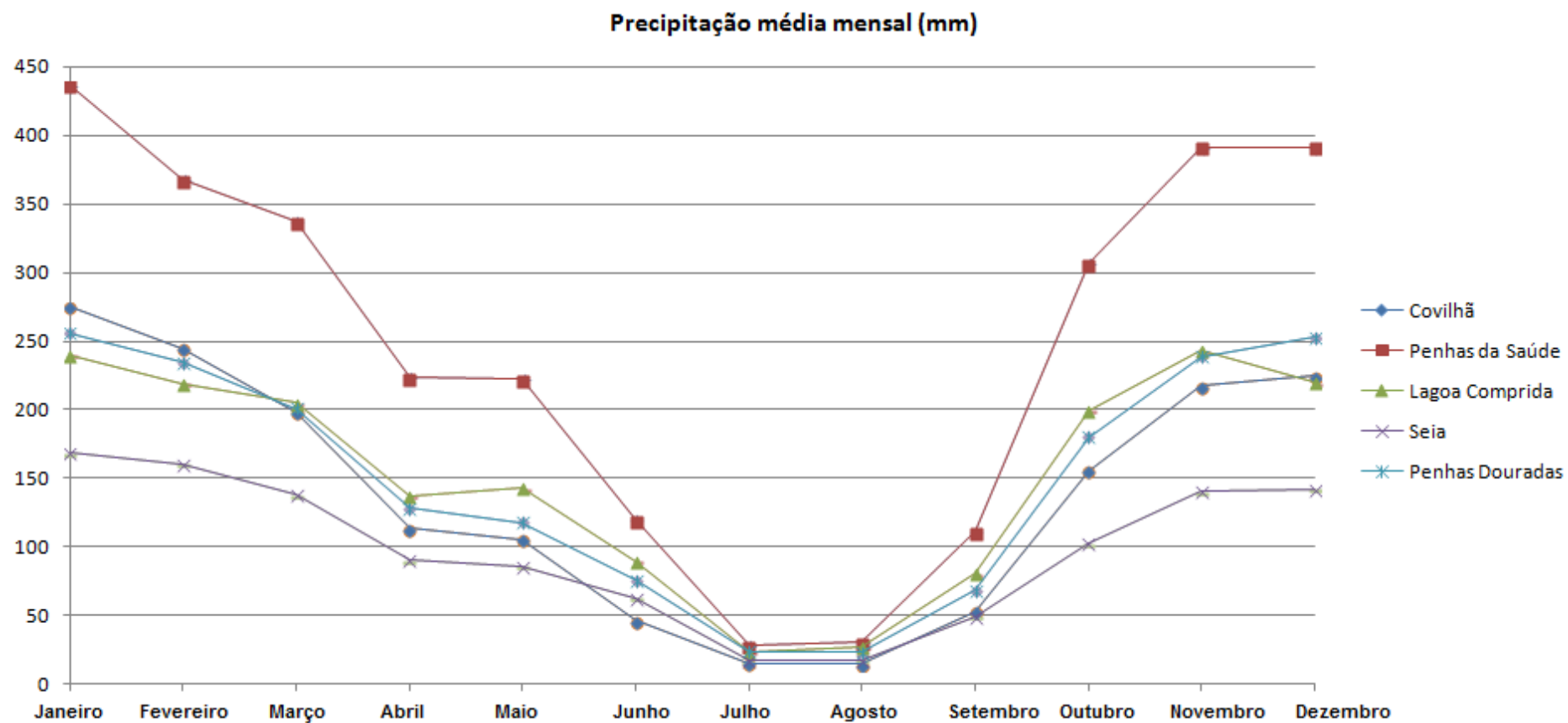


Fig. 3.28. Representação gráfica da distribuição anual da precipitação em estações meteorológicas da região da Serra da Estrela (valores normais de 1951-1980; valores extraídos de INMG, 1991).

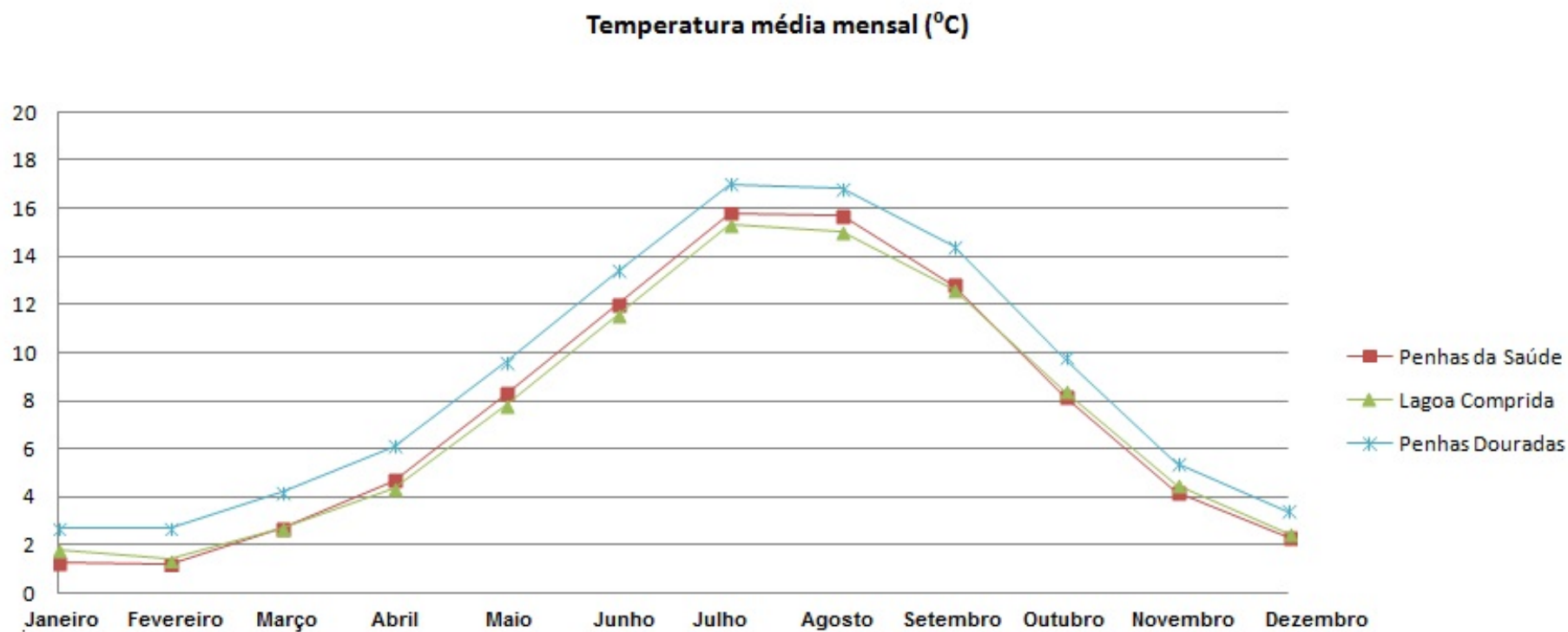


Fig. 3.29. Representação gráfica da distribuição anual da temperatura em estações meteorológicas da região da Serra da Estrela (valores normais de 1951-1980; valores extraídos de INMG, 1991).

4. Enquadramento hidrogeológico

4.1. Introdução

Existem vários fatores que influenciam o funcionamento dos sistemas hidrogeológicos tais como o clima, as características da zona não saturada e as propriedades hidrodinâmicas e geoquímicas das formações geológicas onde circula a água subterrânea. A natureza do solo, em particular a sua porosidade e permeabilidade, apresenta importante influência no que diz respeito à infiltração e recarga dos aquíferos (Hudak, 2001). Verifica-se, portanto, que as propriedades das formações geológicas condicionam, em grande medida, os processos hidrogeológicos, nomeadamente, a infiltração e a recarga dos aquíferos, o tipo de circulação – através de meio poroso ou fraturado – e a interação química água-rocha.

A caracterização de um sistema hidrogeológico implica conhecer os traços distintivos dos materiais geológicos que constituem o sistema aquífero, com atenção, sobretudo, aos que determinam a capacidade de armazenar água (porosidade) e transmitir água (condutividade hidráulica). A forma como estas características hidrológicas se distribuem espacialmente nos diferentes litótipos resulta de processos geodinâmicos internos e externos. Contudo, para além das características referidas, para se conhecer completamente um sistema hidrogeológico é também necessário conhecer as suas características geomorfológicas e estruturais (ex. Fetter, 2001; Fitts, 2002; Carvalho, 2006; Espinha Marques, 2007).

4.2. Hidrogeologia regional

Existe uma íntima relação entre as grandes unidades hidrogeológicas de Portugal Continental (fig. 4.1) e a distribuição espacial das características geológicas do território. Apresenta-se, de seguida, uma caracterização das unidades hidrogeológicas de Portugal Continental (as quais correspondem às unidades morfoestruturais definidas por Ribeiro *et al.* 1979) de acordo com Rodrigues *et al.* 1989, Pedrosa 1998, Almeida *et al.* 2000 e Carvalho 2006:

- **Maciço Antigo:** por ser, essencialmente, formado por rochas ígneas e metamórficas, apresenta, normalmente, fraca aptidão aquífera, com recursos hídricos subterrâneos pouco abundantes. Contudo, à escala local, a ocorrência de rochas carbonatadas do Paleozóico pode originar aquíferos significativos. Os depósitos detríticos do Cretácico ou Jurássico que, igualmente, ocorrem nesta unidade apresentam, à semelhança das rochas cristalinas, uma fraca aptidão aquífera. Assim, nesta unidade, a circulação de água subterrânea faz-se, essencialmente, em meios fissurados, sendo pouco frequente em meios porosos e cársicos. Como referido, o zonamento paleogeográfico e tectónico de Ribeiro *et al.* (1979) segue de perto a divisão em zonas de interesse hidrogeológico. A Serra da Estrela enquadra-se na Zona Centro Ibérica (ZCI) na qual predomina a ocorrência de rochas graníticas, seguida das rochas metamórficas. É, ainda, de destacar a presença de diversas formações quartzíticas, uma vez que estas condicionam, à escala local, a ocorrência de importantes recursos hídricos subterrâneos.
- **Orla Mesocenozóica Ocidental:** devido à grande diversidade de rochas sedimentares que a constituem, a sua aptidão aquífera varia entre elevada, para os maciços calcários carsificados, e fraca, para as formações margosas ou argilosas. Ocorrem também pontualmente rochas ígneas.

- **Orla Mesocenozóica Meridional:** também esta unidade apresenta uma grande variedade de rochas sedimentares, sendo a sua aptidão hidrogeológica muito variável. Assim, no caso das rochas carbonatadas e dos depósitos de cascalheira, a aptidão aquífera é considerada elevada; no caso das formações vulcano-sedimentares, argilosas ou areno-argilosas, a aptidão hidrogeológica é fraca.
- **Bacia Cenozóica do Tejo-Sado:** tal como as Orlas, esta unidade apresenta uma aptidão hidrogeológica muito variável. Assim, as formações greso-calcárias, as aluviões e os terraços fluviais são dotados de uma elevada aptidão aquífera, já os maciços argilosos e argilo-margosos têm fraca aptidão aquífera.

Em 2006, J. M. Carvalho, propôs uma classificação geral dos meios aquíferos, de acordo com determinados critérios, a saber:

- (a) textura/estrutura – aquíferos porosos, fissurados ou cárlicos;
- (b) modo de jazida – aquíferos livres, confinados ou semiconfinados;
- (c) localização geográfica – aquíferos costeiros ou continentais.

Assim, os aquíferos do Maciço Antigo (maioritariamente, constituídos por rochas cristalinas) são fissurados, livres, semiconfinados ou confinados e são continentais. Os aquíferos sedimentares (muito menos frequentes nesta unidade hidrogeológica) são porosos, livres e continentais.

A constituição química das águas subterrâneas normais da zona do Maciço Antigo, tem sido alvo de diversos estudos de autores como Marques (1999), Almeida *et al.* (2000), Espinha Marques (2007), Afonso *et al.* (2010) e Carreira *et al.* (2011).

As águas desta região são classificadas como hipossalinas, apresentam pH entre 5 e 7 e uma mineralização nas rochas metamórficas algo mais elevada do que nas rochas graníticas. Apresentam *facies* hidrogeoquímicas mistas, tanto ao nível dos cátions como dos aniões. Tendo em especial atenção os granitos, as águas que neles

circulam apresentam como cátions maioritários o sódio, o potássio e o cálcio, e apresentam como aniões maioritários o bicarbonato e/ou o cloreto (ex. Almeida *et al.* 2000, Marques *et al.* 2003).

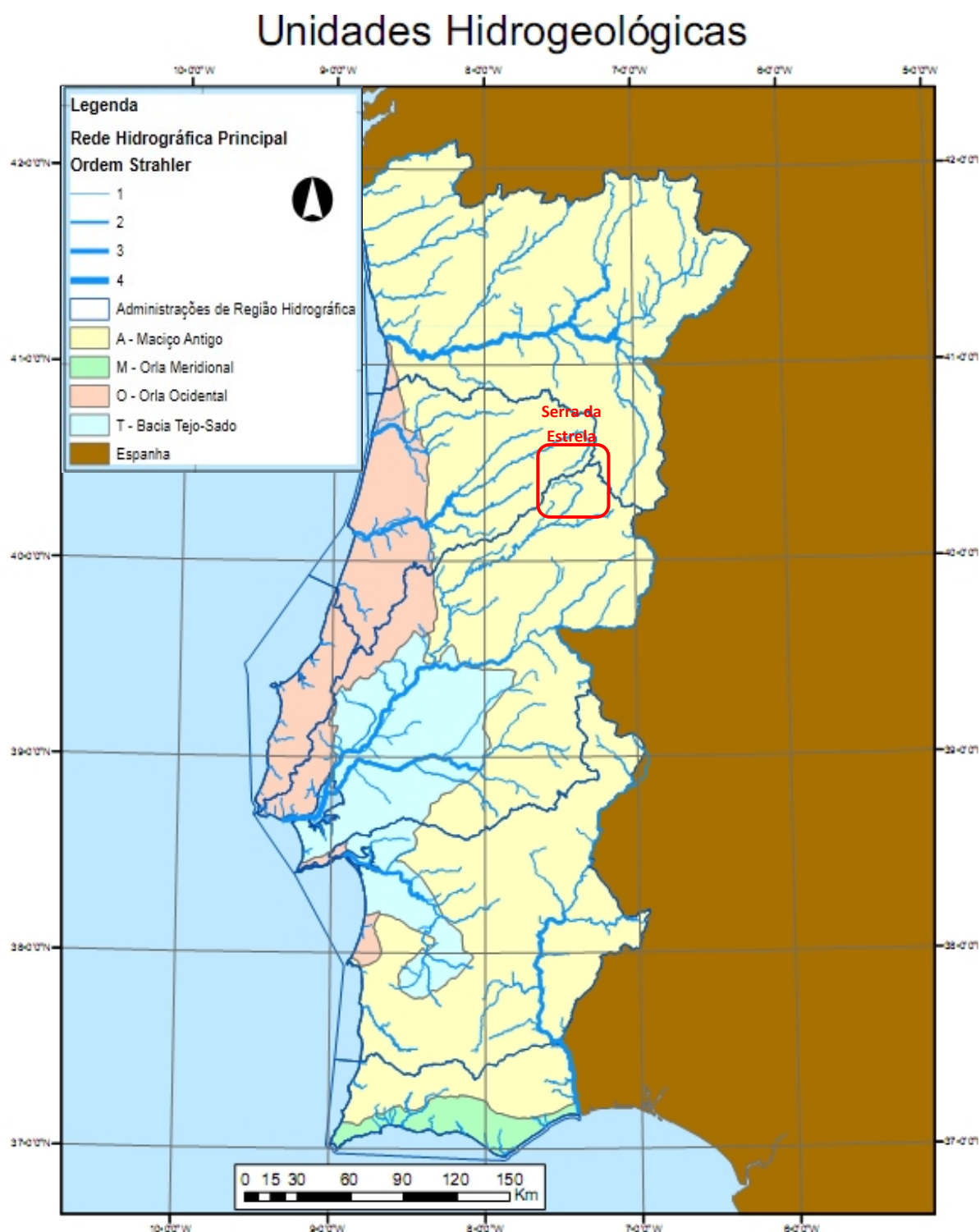


Fig. 4.1. Unidades hidrogeológicas do norte e centro de Portugal (adaptado de SNIRH, 2009).

O maciço da Serra da Estrela distribui-se por três bacias hidrográficas: as bacias do Tejo e do Mondego, abrangem a maior parte da região, enquanto que uma pequena área, situada no extremo nordeste do maciço, junto à cidade da Guarda, pertence à bacia do Douro (fig. 4.2).

Os sistemas hidrogeológicos locais são, maioritariamente, de natureza granítica ou metassedimentar, existindo pequenas áreas de origem sedimentar (ex. INAG 1999, Espinha Marques *et al.*, 2010).

As características dos sistemas hidrogeológicos da região da Serra da Estrela são condicionadas pelas suas características geológicas, geomorfológicas e climáticas. No que diz respeito à geologia, interessa perceber os fenómenos de infiltração, recarga e circulação de água nos aquíferos, tendo em conta a distribuição espacial dos meios de circulação fraturados e porosos (ex. Espinha Marques *et al.*, 2005; Espinha Marques *et al.*, 2010; Espinha Marques, 2010).

À escala local, os meios porosos, que ocorrem nos níveis superiores dos sistemas aquíferos, estão relacionados com rochas de natureza sedimentar ou cristalinas com meteorização e/ou tectonização intensa. Já os meios fraturados são característicos das rochas cristalinas pouco meteorizadas e tectonizadas, podendo ocorrer quer junto à superfície do sistema quer sob as formações mais porosas. Assim, dado o predomínio de rochas de natureza cristalina fracamente meteorizadas e tectonizadas, na região da Serra da Estrela os meios fraturados são mais frequente do que os meios porosos mais raros (ex. Espinha Marques *et al.*, 2005; Espinha Marques *et al.*, 2010).

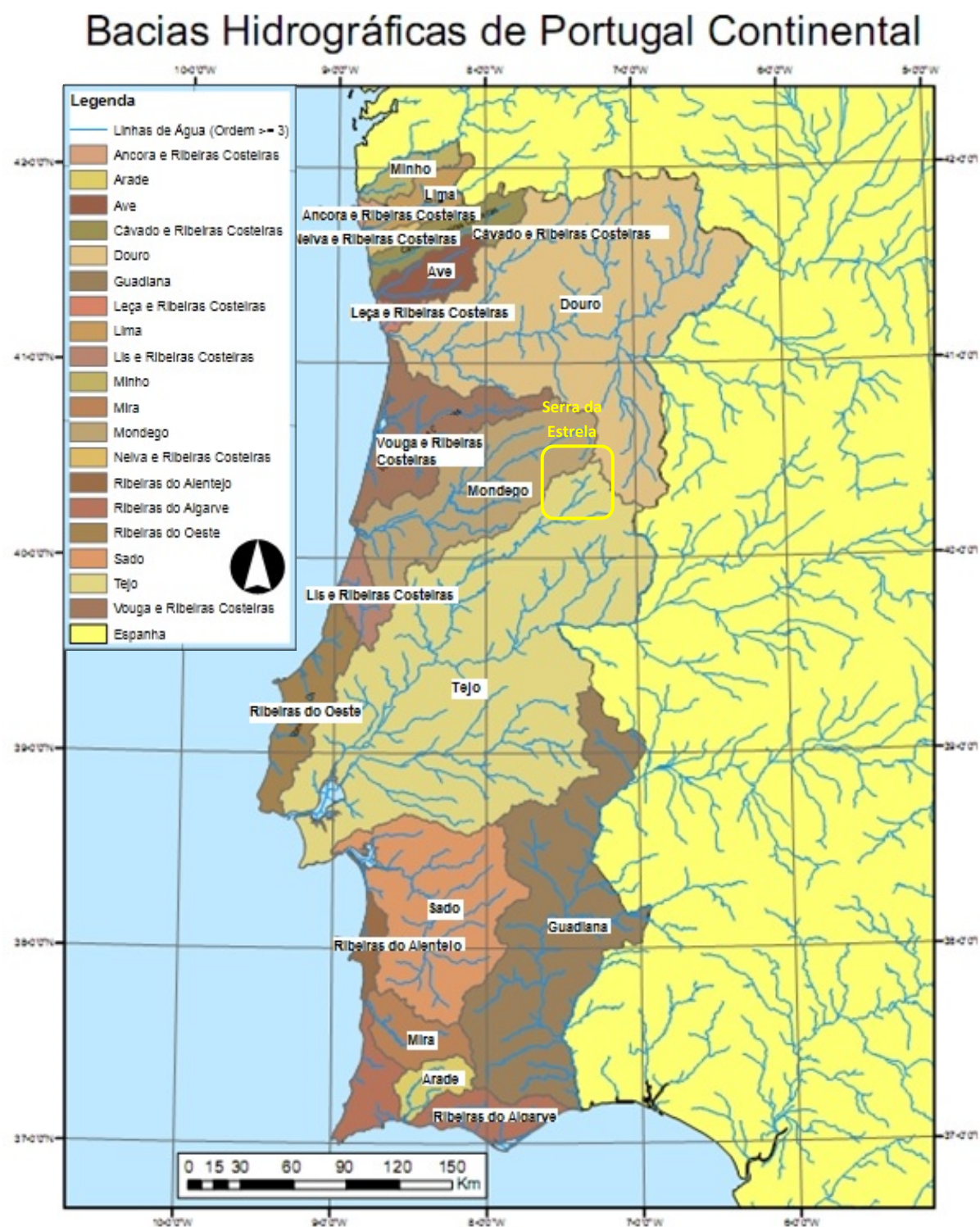


Fig. 4.2. Bacias hidrográficas do norte e centro de Portugal Continental (adaptado de SNIRH, 2009).

Relativamente à geomorfologia, pode-se verificar que a forma do relevo do maciço montanhoso influencia o funcionamento dos sistemas hidrogeológicos, nomeadamente, no que respeita aos processos de infiltração e recarga, que tendem a ocorrer, especialmente, em zonas aplanadas, enquanto que a descarga se dá, sobretudo, em fundos de vale. Tal como foi referido anteriormente, também o clima influencia fortemente o funcionamento do sistema hidrogeológico (ver capítulo 3). A este respeito é de destacar que a distribuição espacial da precipitação e da temperatura do ar é, fundamentalmente, determinada pelo relevo e pela altitude. As áreas mais elevadas da montanha apresentam os maiores volumes de precipitação anual média e os menores valores da temperatura média do ar (ex. Espinha Marques *et al.*, 2005; Espinha Marques *et al.*, 2010).

O sistema hidrogeológico representado pelo modelo hidrogeológico conceptual local, pretende esquematizar dois subsistemas interligados: o das águas subterrâneas normais e o das águas subterrâneas minerais (fig. 4.3). Assim, são representados três tipos de aquíferos com predominância dos meios fissurados sobre os porosos (ver quadro 4.1 e fig. 4.3) superficiais, intermédios e profundos (Espinha Marques, 2010).

Segundo o modelo conceptual proposto, a recarga dos aquíferos livres é realizada pela infiltração resultante da precipitação de chuva ou neve. Tal como foi referido, a infiltração e recarga dos aquíferos livres ocorre, preferencialmente, nas zonas com solos mais espessos e cobertura vegetal mais abundante. De acordo com Espinha Marques (2007) e Espinha Marques *et al.*, 2011a, através de modelação hidrológica com recurso ao programa VISUAL-BALAN, conclui-se que cerca de um terço da precipitação média anual sofre evapotranspiração ou interceção, enquanto que o escoamento superficial ultrapassa 10%. O fluxo lateral através da zona não saturada (escoamento hipodérmico) corresponde a cerca de 40% da precipitação média anual. Desta forma, a taxa de recarga dos aquíferos deverá corresponder a cerca de 15% da precipitação média anual.

Por sua vez, a recarga dos aquíferos hidrominerais tem origem na circulação descendente das águas procedentes dos aquíferos superficiais e intermédios (fig. 4.3). As áreas de recarga do sistema hidromineral estão associadas a zonas do maciço granítico com maior permeabilidade, coincidente com a presença de estruturas geológicas de importância regional como a zona de falha de Bragança-Vilariça-Manteigas e estruturas conjugadas (Espinha Marques, 2007; Espinha Marques *et al.*, 2011a).

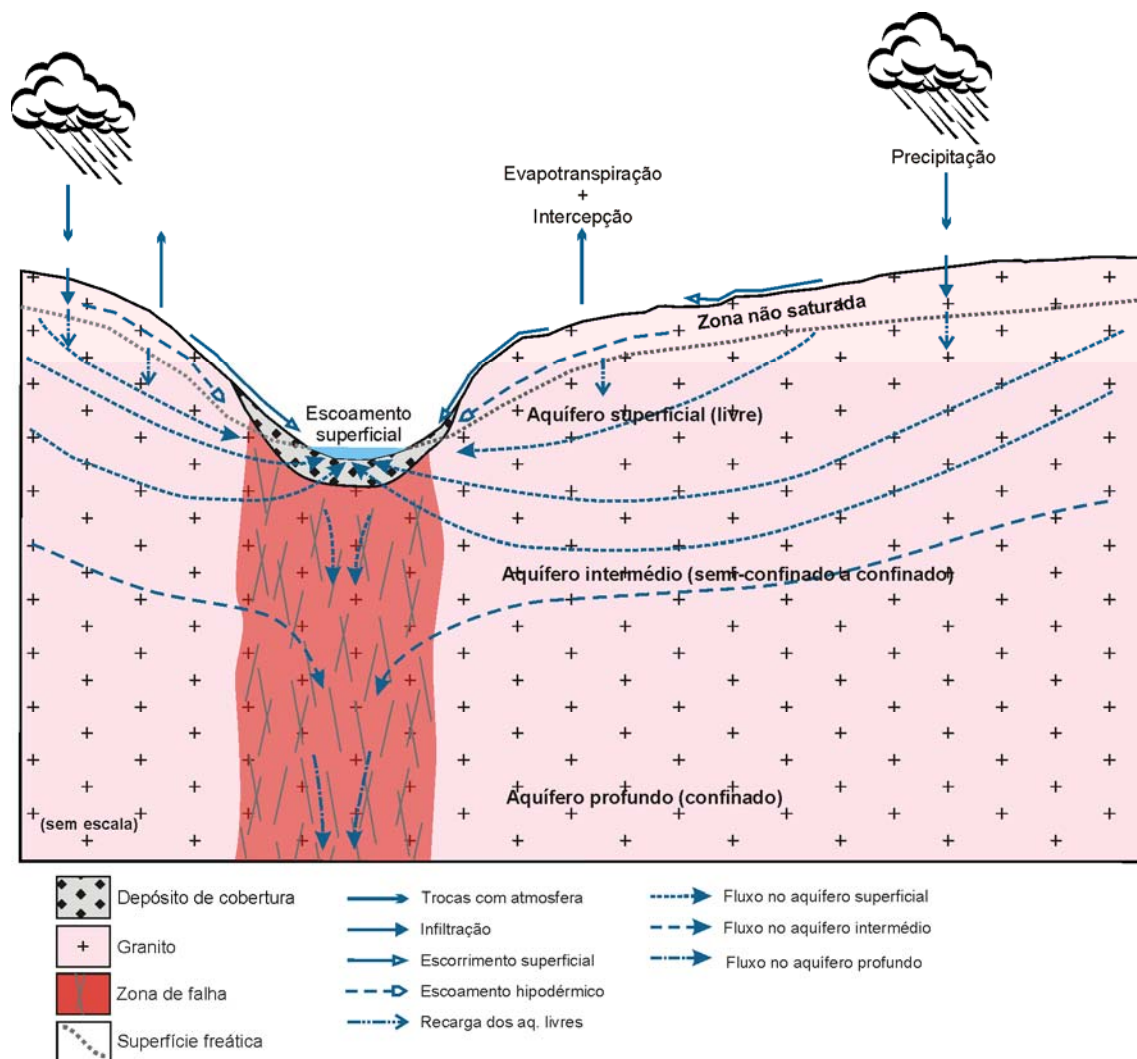


Fig. 4.3. Representação do modelo hidrogeológico conceptual da Bacia do Zêzere a Montante de Manteigas (extraído de Espinha Marques, 2007).

Quadro 4.1. Caraterísticas dos aquíferos da Bacia do Zêzere a Montante de Manteigas.

Tipo de aquífero	Funcionamento hidráulico	Contato hidráulico	Tipo de água	Meio de circulação
Aquíferos superficiais	Livres	Zona não saturada, rede hidrográfica, atmosfera e aquíferos intermédios	Águas subterrâneas normais	Poroso ou fissurado
Aquíferos intermédios	Semiconfinados a confinados	Aquíferos superficiais, profundos e potencialmente com a rede hidrográfica	Águas subterrâneas normais	Fissurado
Aquíferos profundos	Confinados	Aquíferos intermédios	Águas minerais	Fissurado

4.3. Inventário hidrogeológico

A definição da rede de monitorização de pontos de água que constituem o inventário realizado foi efetuada com o intuito de servir de suporte ao estudo hidrogeológico do SSTC através da análise química convencional e isotópica das águas subterrâneas (fig. 4.4). Para além de ter em atenção a representatividade espacial e geológica dos pontos de água selecionados, foi também estabelecido que estes deveriam apresentar caudal durante todo o ano e estar acessíveis mesmo aquando da queda de precipitação sob a forma de neve.

Do modelo de ficha de inventário adotado, representado no quadro 4.2, constam informações relativas à designação, tipo, localização, geologia e características físico-químicas, entre outras, de cada um dos pontos de água.

A monitorização dos pontos de água foi realizada nos meses de Fevereiro, Maio, Setembro e Dezembro de 2010, nos meses de Abril, Junho, Setembro e Dezembro de 2011 e Julho de 2012. As características gerais de cada ponto de água inventariado constam do quadro 4.3.

No anexo I estão presentes as fichas de inventário de cada um dos pontos da rede de monitorização.

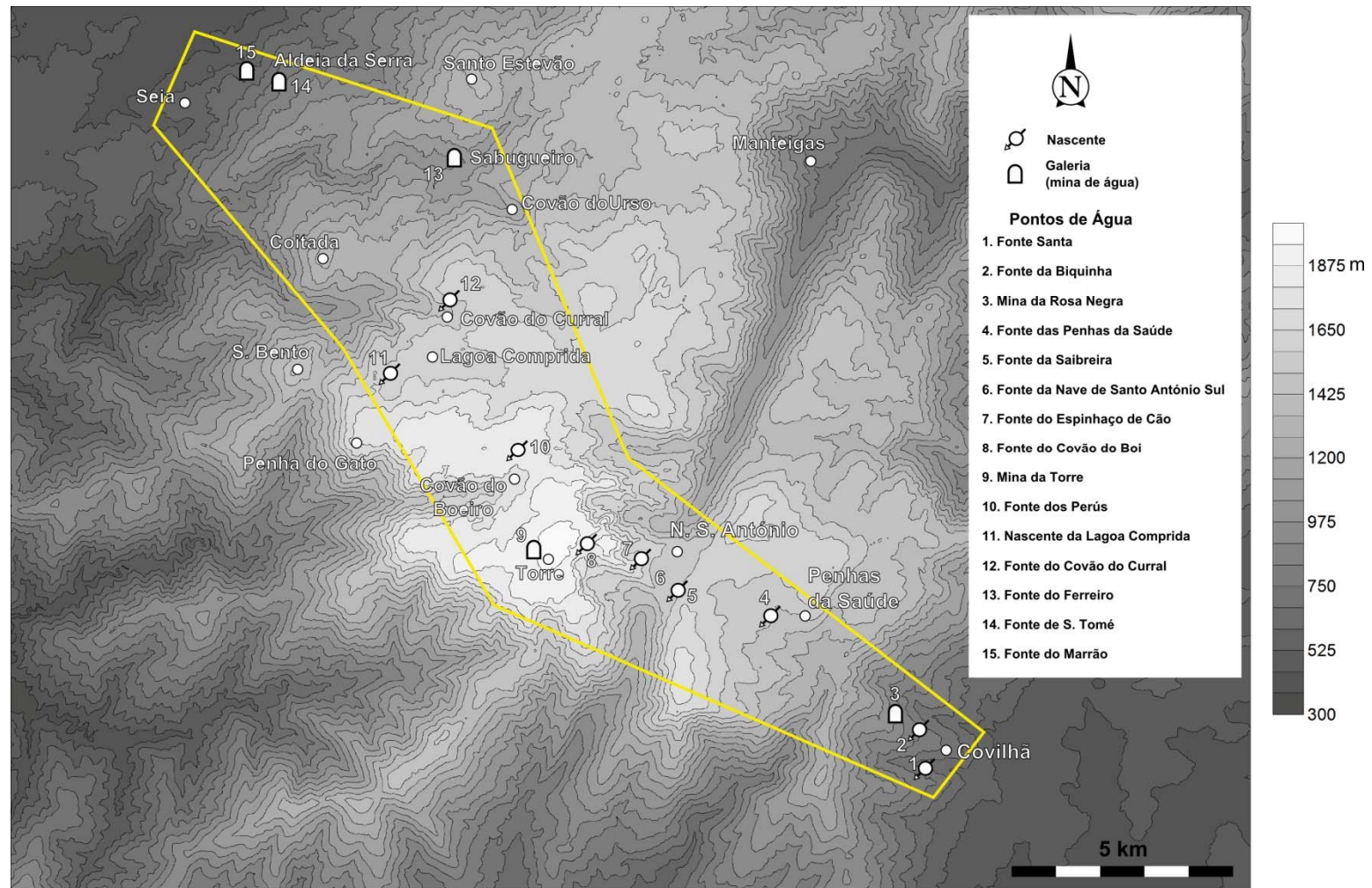




Fig. 4.4. Mapa do inventário hidrogeológico do SSTC.

Quadro 4.2. Modelo da ficha de inventário hidrogeológico utilizada.

Inventário Hidrogeológico

Data: 04/04/2011

Hora: 11:00

Ficha nº 1	Designação: Fonte Santa	Tipo: Nascente
Atitude: 670 metros	Carta topográfica: 224 (Teixoso-Covilhã) Escala: 1/25 000	Litologia da Bacia hidrogeológica: Granito de Seia
Coordenadas (WGS84) N40° 16' 40,6" W7° 30' 50,5"	Carta geológica: 20B (Covilhã) Escala: 1/50 000	Ocupação do solo da bacia hidrogeológica: Floresta de folhosas e resinosas
Tipo de nascente: <input checked="" type="checkbox"/> Permanente <input type="checkbox"/> Temporária	Condições de acesso: acessível durante todo o estudo	
	Observações	
Emergência através de: <input checked="" type="checkbox"/> Tubo Rocha Solo Zona alagada	Geomorfologia: Planalto Encosta <input checked="" type="checkbox"/> Vale	Utilização: <input checked="" type="checkbox"/> Consumo humano Rega Pecuária
Características e propriedades da água		
Cheiro: inodora	Cor: incolor	Turbidez: água límpida
Parâmetros físico-químicos da água		
Temperatura: 13,2°C	Condutividade: 18 µS/cm	pH: 5,17
Documento fotográfico		Localização
		

Quadro 4.3. Caraterísticas dos pontos de água monitorizados.

Identificação do ponto de água	Tipo de ponto de água	Litologia	Ocupação do solo na bacia hidrogeológica	Altitude (m)	Encosta
Fonte Santa	Nascente	Granito de Seia	Floresta de folhosas e resinosas	670	Oriental
Fonte da Biquinha	Nascente	Granito da Covilhã	Urzal e afloramentos rochosos	810	Oriental
Mina da Rosa Negra	Mina de água	Granito da Covilhã	Floresta de folhosas e resinosas	950	Oriental
Fonte das Penhas da Saúde	Nascente	Granito da Covilhã	Habitações, urzal	1480	Oriental
Fonte da Saibreira	Nascente	Granito da Estrela	Urzal, giestal	1555	Oriental
Fonte da Nave de Stº. António Sul	Nascente	Depósitos glaciários e fluvioglaciários	Urzal, giestal, estrada	1585	Oriental
Fonte do Espinhaço de Cão	Nascente	Granito da Covilhã	Urzal, afloramentos rochosos	1625	Oriental
Fonte do Covão do Boi	Nascente	Granito da Covilhã	Urzal, afloramentos rochosos	1850	Oriental
Mina da Torre	Mina de água	Granito da Estrela	Afloramentos rochosos, área urbanizada, estradas	1990	n. a.
Fonte dos Perús	Nascente	Granito da Estrela	Cervunal	1840	Ocidental
Nascente da Lagoa Comprida	Nascente	Granito de Seia	Urzal, giestal, cervunal, estrada	1595	Ocidental
Fonte do Covão do Curral	Nascente	Granito do Covão do Curral	Urzal, giestal	1500	Ocidental
Fonte do Ferreiro	Mina de água	Granito de Seia	Área agrícola em socacos	1050	Ocidental
Fonte de S. Tomé	Mina de água	Granito de Seia	Floresta de folhosas	810	Ocidental
Fonte do Marrão	Mina de água	Granito de Seia	Área agrícola em socacos	565	Ocidental
Fonte da Jonja	Nascente	Depósito fluvioglaciário	Floresta de folhosas, urzal, giestal e cervunal	1470	Oriental
Fonte do Sabugueiro	Nascente	Granito de Seia	Urzal, giestal	1114	Ocidental

Nota: os pontos sombreados a cinzento claro foram utilizados apenas para a análise aos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos.

n. a. – não aplicável.

5. Hidrogeoquímica

5.1. Introdução

Autores como Freeze & Cherry (1979) e Fetter (2001) defendem que o estudo dos processos hidrogeoquímicos é fundamental para a compreensão dos sistemas hidrogeológicos. Na verdade, a sua relevância deve-se ao facto de que, através deste tipo de estudos, se podem obter informações acerca de inúmeros parâmetros que constituem um sistema hidrogeológico, tais como: qual o processo de recarga dos aquíferos, os tipos de solos e rochas por onde circulam, a interação química entre as águas e as rochas, a definição de linhas de fluxo subterrâneo, entre outros.

A hidrogeoquímica desempenha um papel essencial na avaliação da qualidade da água fornecida por um determinado sistema aquífero, possibilitando, igualmente, a determinação da origem de possíveis contaminações.

5.1.1 Composição das águas subterrâneas

As águas naturais nunca são puras; contêm sempre pelo menos pequenas quantidades de sais ou gases. A composição das soluções aquosas são o resultado de múltiplos fatores, como por exemplo: a composição inicial da água, a pressão

parcial da fase gasosa, a constituição da matéria mineral em contato com a água, o pH e o potencial de oxidação-redução da solução (Fetter, 2001).

A composição das águas subterrâneas é o resultado da interação de diversas fontes com início na dissolução de gases atmosféricos, passando pela dissolução dos gases dos solos, à erosão dos solos e das rochas, e de reações químicas que ocorrem abaixo da superfície da Terra (ex. Heath, 1983; Hem, 1985). Para além da sua concentração iónica, daí a importância da determinação da sua composição em componentes maioritários e minoritários, também a presença ou ausência de cobertura vegetal, a qual determina uma maior ou menor pressão parcial de CO_2 dissolvido no sistema, contribui fortemente para a composição das águas subterrâneas.

As águas subterrâneas contêm sais dissolvidos, dissociados em catiões e aniões. Os iões maioritários ocorrem em concentrações superiores a 1 mg/L nas águas naturais, sendo os catiões dissolvidos: o sódio (Na^+), o cálcio (Ca^{2+}), o magnésio (Mg^{2+}) e o potássio (K^+) e os aniões: o cloro (Cl^-), o bicarbonato (HCO_3^-) e o sulfato (SO_4^{2-}) (ex. Fetter, 2001; Mazor, 2004). A sílica (SiO_2), substância não-iónica, é também considerada um componente maior (Fetter, 2001).

Apesar da distinção entre componentes maiores e menores ser feita tendo em conta a sua concentração nas águas subterrâneas, a sua classificação não é uniforme. Os componentes menores são, habitualmente, utilizados para definir solutos cuja concentração nas águas é sempre, ou quase sempre, entre 0,1 mg/L e 1,0 mg/L. Contudo, apesar de se supor que a sua ocorrência em águas naturais seja comum, a sensibilidade dos métodos de amostragem e de análise não permite uma definição tão restrita (Hem, 1985). Este facto leva a que exista flexibilidade quanto à classificação de determinados elementos como maiores ou menores, como é o caso do elemento ferro, adequando-se aos objetivos do estudo a realizar. Os componentes traço ocorrem, normalmente, com concentrações inferiores a 0,1 mg/L.

Segundo Custódio & Llamas (1996), em diversos casos de estudo, os íons carbonato (CO_3^{2-}), nitrato (NO_3^-) e ferro ferroso (Fe^{2+}) poderão ser considerados componentes maiores.

São considerados como componentes menores: o manganês (Mn^{2+}), o amônio (NH_4^+), o amoníaco (NH_3), o estrôncio (Sr^{2+}), o lítio (Li^+) e o alumínio (Al^{3+}) (Custódio & Llamas, 1996). Adicionalmente, Hudak (2001) considera também o ferro ferroso (Fe^{2+}), o flúor (F^-) e o boro (B^{+3}) como elementos minoritários.

A água pode conter uma maior ou menor quantidade de gases por simples dissolução, como é o caso do oxigênio (O_2) ou por reação química, como no caso do dióxido de carbono (CO_2). O coeficiente de absorção de substâncias gasosas pela água é tanto menor quanto maior a temperatura da água e também tanto menor quanto maior a quantidade de sais dissolvidos (Custódio & Llamas, 1996).

A maior fonte de gases contidos na água é a atmosfera, contribuindo com azoto (N_2), oxigênio (O_2) e gases nobres como o hélio (He), o néon (Ne), o argon (Ar), o krípton (Kr) e o xénon (Xe). Outros gases de origem biogénica são adicionados à água no solo, como por exemplo, o dióxido de carbono (CO_2).

À semelhança dos componentes iónicos, também os gases são considerados maioritários ou minoritários na água. Os gases maioritários dissolvidos na água subterrânea são o oxigênio (O_2), o dióxido de carbono (CO_2) e o azoto (N_2). Os gases minoritários incluem o ácido sulfídrico (H_2S) e o metano (CH_4) (Hudak, 2001).

5.1.2. Entrada e transporte de solutos na água

Soluto é qualquer substância dissolvida numa dada solução. Os solutos em águas subterrâneas podem ocorrer naturalmente ou podem ser introduzidos por várias fontes (antrópicas ou naturais).

Sódio (Na^+): o catião sódio apresenta uma elevada solubilidade, ocorrendo, frequentemente, associado ao anião cloreto. Geralmente, águas com elevados teores de Na^+ apresentam elevados teores de F^- (Custódio & Llamas, 1996). Uma vez em solução, o Na^+ tende a manter-se nesse estado, não havendo reações de precipitação que mantenham os teores de sódio baixos na água. O Na^+ é retido pela adsorção na superfície dos minerais, especialmente nos que têm alta capacidade de trocas catiónicas, como as argilas. Contudo, as trocas catiónicas são bastante mais fortes entre iões divalentes do que entre iões monovalentes como o sódio. Assim, os processos de troca catiónica nas águas subterrâneas tendem a extrair iões divalentes da solução e trocá-los por iões monovalentes (Custódio & Llamas, 1996). Em águas naturais, a concentração de Na^+ tende a situar-se entre 0 a 10 500 mg/L (Custódio & Llamas, 1996), sendo as suas principais fontes naturais i) a hidrólise de minerais silicatados, sobretudo as plagioclases sódicas como a albite, e ii) a água do mar (Hem, 1985). Águas doces apresentam usualmente concentrações entre 1 e 150 mg/L (Custódio & Llamas, 1996).

Potássio (K^+): à semelhança do catião sódio, também o catião potássio apresenta elevada solubilidade e baixa tendência para precipitar (Custódio & Llamas, 1996). A sua concentração em águas naturais varia entre 0 e 380 mg/L (Custódio & Llamas, 1996). Em águas doces tende a variar entre 0,1 e 10 mg/L, sendo a sua principal fonte natural a hidrólise de minerais silicatados como a ortoclase e a microclina, as micas e a leucite (ex. Hem, 1985; Custódio & Llamas, 1996). Ao contrário do Na^+ , que tem tendência a permanecer em solução uma vez libertado pelos minerais silicatados, o K^+

é libertado pelos minerais com dificuldade e tem grande tendência a ser reincorporado pelos produtos residuais da alteração das rochas, especialmente certos minerais argilosos. No geral, as águas naturais apresentam valores de K^+ menores do que de Na^+ . A baixas temperaturas os feldspatos que reagem com a água produzem minerais argilosos. Minerais ricos em potássio, como a ilite, são depositados mantendo baixa a concentração deste ião na água a baixas temperaturas (Albaréde, 2003).

Cálcio (Ca^{2+}): catião muito solúvel, precipita facilmente sob a forma de $CaCO_3$ (Custódio & Llamas, 1996). A concentração de cálcio em águas naturais varia habitualmente entre 4 e 400 mg/L e, normalmente, entre 10 e 250 mg/L nas águas doces (ex. Hem, 1985; Custódio & Llamas, 1996). A sua fonte natural está associada à hidrólise de minerais silicatados e à dissolução de minerais carbonatados. O cálcio é um constituinte fundamental de diversos minerais, estando presente, sobretudo, nas piroxenas, anfíbulas, e feldspatos, como as plagioclases cálcicas (ex. anortite). Nos sistemas aquíferos, o comportamento deste catião é regulado pela disponibilidade de cálcio solúvel e pelo equilíbrio da fase gasosa em solução, que envolve o dióxido de carbono, ou pela disponibilidade de enxofre sob a forma de sulfato (Hem, 1985). O cálcio é um elemento móvel nos processos de interação água-rocha a qualquer temperatura. As plagioclases, as clinopiroxenas e as anfíbulas são facilmente alteradas pela água em equilíbrio com CO_2 atmosférico. Em ambientes carbonatados, a concentração de cálcio é fundamentalmente controlada pela solubilidade da calcite e aragonite, sendo a calcite menos solúvel do que a aragonite (Albaréde, 2003).

Magnésio (Mg^{2+}): o catião magnésio apresenta características hidrogeoquímicas semelhantes ao cálcio sendo, contudo, mais solúvel e ligeiramente mais difícil de precipitar (Custódio & Llamas, 1996). A concentração do catião Mg^{2+} nas águas naturais varia entre 1 e 1 350 mg/L (Custódio & Llamas, 1996) e, normalmente, entre 10 e 250 mg/L em águas doces (ex. Hem, 1985; Custódio & Llamas, 1996). A sua origem natural é a alteração de minerais silicatados, nomeadamente os minerais

ferromagnesianos, e a dissolução de minerais carbonatados. Nas rochas ígneas, o magnésio ocorre em minerais como as olivinas, as piroxenas, as anfíbolas e as biotites. Em rochas alteradas ocorre em minerais como a clorite e a serpentina. Nas formações sedimentares, ocorrem na magnesite e hidromagnesite.

Cloreto (Cl^-): o anião cloreto é muito solúvel e estável em solução sendo dificilmente precipitável. Aparece frequentemente associado ao catião Na^+ , não sendo, contudo, a sua concentração relativa necessariamente a mesma (Custódio & Llamas, 1996). A concentração em águas naturais pode variar entre 1 e 19 000 mg/L, estando a sua origem natural associada à dissolução de formações evaporíticas, à interação água-rocha em ambientes sedimentares e à água do mar (Hem, 1985). Em águas doces a sua concentração varia, normalmente entre 10 e 250 mg/L (Custódio & Llamas, 1996). O ião Cl^- está presente em vários tipos de minerais constituintes das rochas. Nas rochas ígneas, aparece como constituinte de diversos minerais, como a sodalite e a apatite. O cloreto não exerce papel significativo ao nível das reações de oxidação ou redução, não forma soluções complexas importantes a menos que a sua concentração no meio seja extremamente elevada, não origina sais de baixa solubilidade e não é facilmente absorvido pela superfície dos minerais (Hem, 1985). Dado que um ião conservativo (Stober & Bucher, 1999), como é o caso do Cl^- , não participa nas reações químicas, a sua concentração nas águas depende apenas de processos de concentração/diluição. Trata-se de um elemento característico das águas termais, de circulação profunda, aparecendo nas águas frias superficiais em concentrações consideravelmente inferiores. Estas características tornam este ião um excelente traçador na maior parte dos sistemas hidrogeológicos (Garcia, 1986). Com o aumento da profundidade, a tendência de aumento da concentração de Cl^- nas águas em ambientes graníticos, pode dever-se à interação água-rocha, onde se verifica alteração de minerais como a biotite e a anfíbola, e a dissolução da halite (Stober & Bucher, 1999).

Sulfato (SO_4^{2-}): é um anião moderadamente a muito solúvel que precipita dificilmente. A sua concentração em águas naturais pode chegar até 2 700 mg/L, variando, normalmente, entre 2 e 150 mg/L em águas doces (ex. Hem, 1985; Custódio & Llamas, 1996). A sua origem nas águas deve-se à interação água-rocha em ambientes geológicos com minerais ricos em sulfuretos. Este ião está presente tanto em rochas ígneas como em rochas sedimentares contendo sulfuretos metálicos. Minerais como a pirite constituem fontes naturais de sulfato e ferro nas águas subterrâneas. O sulfato ocorre, também, em certos feldspatóides mas a sua origem está sobretudo ligada a sedimentos evaporíticos onde ocorre sob a forma de anidrite ou gesso (Hem, 1985).

Bicarbonato e carbonato (HCO_3^- e CO_3^{2-}): ambos os aniões estão intimamente relacionados com o teor de dióxido de carbono gasoso dissolvido bem como com o pH das soluções em que ocorrem (fig. 5.1). Não apresentam aptidão para reações de oxidação/redução em águas naturais e têm tendência a precipitar como CaCO_3 (ex. Hem, 1985; Custódio & Llamas, 1996). Em águas naturais, o ião bicarbonato pode atingir concentrações entre 0 e 1 000 mg/L, variando habitualmente entre 50 e 350 mg/L, chegando por vezes a 800 mg/L, em águas doces. O ião carbonato ocorre em concentrações bastante inferiores relativamente ao bicarbonato, não atingindo, normalmente, concentrações superiores a 50 mg/L em águas naturais (ex. Hem, 1985; Custódio & Llamas, 1996).

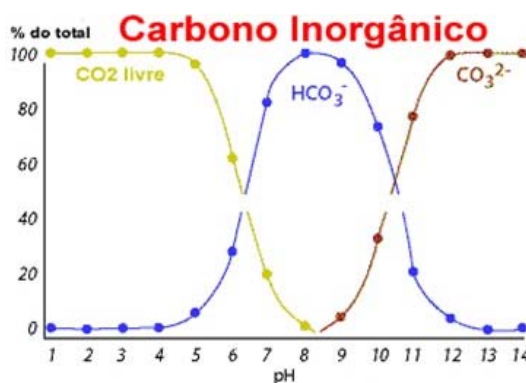


Fig. 5.1. Relação entre teores de dióxido de carbono, bicarbonato e carbonato e o pH (extraído de Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013).

Sílica (SiO_2): a sílica ocorre, geralmente, na água sob a sua forma não-iônica (SiO_4H_4) e apenas uma pequena parte sob a forma iônica (SiO_4H_3^-) para valores de pH normais (Custódio & Llamas, 1996). A sílica sob a forma iônica contribui para a alcalinidade da água, contudo, a ação do CO_2 atua de forma a evitar que o pH suba limitando assim a solubilidade da sílica. Habitualmente, a concentração de sílica nas águas naturais varia entre 1 e 30 a 40 mg/L, contudo, as águas bicarbonatadas sódicas podem conter até 100 mg/L e as águas com pH muito elevado podem atingir até 1 000 mg/L deste componente (ex. Hem, 1985; Custódio & Llamas, 1996). Uma fonte natural de sílica nas águas é a hidrólise dos silicatos, associada à formação de minerais argilosos (com concentrações nas águas subterrâneas entre 20 e 100 mg/L). Contudo, uma reduzida percentagem da sílica provem da dissolução do quartzo (Hem, 1985).

À medida que a água subterrânea se move ao longo da sua rede de fluxo, vai aumentando o conteúdo em sólidos dissolvidos totais (SDT), de tal forma que a qualidade da água muda ao longo da linha de fluxo pois a concentração de solutos aumenta com o tempo de residência em meio subterrâneo (ex. Freeze & Cherry, 1979; Hudak, 2001).

Tal como se referiu anteriormente, minerais como a calcite e os feldspatos são por vezes dissolvidos por águas de precipitação de baixo pH, nas áreas de recarga dos sistemas aquíferos, libertando iões cálcio e bicarbonato para a água. As águas subterrâneas transportam os iões cálcio que são, eventualmente, trocados por iões sódio. Daí resulta que, habitualmente, as águas subterrâneas tendam a evoluir de águas bicarbonatadas-cálcicas — nas áreas de recarga — para águas cloretadas-sódicas — nas áreas de descarga. Esta evolução hidrogeoquímica é, sobretudo, controlada pela mineralogia do aquífero, a interação água-rocha, pela velocidade do fluxo subterrâneo, pela extensão das linhas de fluxo, pelo tempo de residência e pela existência de possíveis processos de mistura entre águas associadas a diferentes sistemas aquíferos (Hudak, 2001).

Uma vez que a maior fonte natural de elementos maiores nas águas subterrâneas diz respeito à alteração dos minerais constituintes das rochas dos sistemas aquíferos, importa salientar os principais mecanismos de ataque químico provocado pelas águas subterrâneas aos minerais. Diversas substâncias podem ser colocadas em solução por processos simples (ex. dissolução) como acontece com o cloreto de sódio e com o gesso. Contudo, outras substâncias, por serem muito pouco solúveis, necessitam de passar por reações mais ou menos irreversíveis para que possam ser dissolvidas total ou parcialmente.

Assim, as transformações responsáveis pela alteração química dos minerais são:

- a hidratação, que consiste na incorporação de água nos cristais;
- a hidrólise, reação entre o mineral e a água. Este mecanismo de transformação química dos minerais é fundamental em ambientes graníticos. Os iões da água, H^+ e OH^- , atuam como ácidos e bases, respetivamente, sobre as espécies químicas que constituem os minerais, originando reações químicas capazes de alterar o pH da água. Este tipo de reação ocorre, sobretudo, sobre sais ácidos e bases fracas;
- os fenómenos de oxidação-redução;
- as alterações de pH;
- os processos biológicos, por exemplo, por aumento da concentração de CO_2 proveniente da decomposição da matéria orgânica (Custódio & Llamas, 1996).

De acordo com Hudak (2001), existem dois processos que afetam o transporte de solutos nas águas subterrâneas: a advecção e a dispersão hidrodinâmica. O processo de advecção ocorre quando a água subterrânea transporta os solutos ao longo do sistema de fluxo subterrâneo. A difusão hidrodinâmica faz a dispersão das águas subterrâneas e dos seus solutos por agitação mecânica, a qual consiste na disseminação dos solutos pela matriz do aquífero, e por difusão que pode ocorrer

mesmo em águas que não se encontrem em movimento, mobilizando os solutos de áreas de alta concentração para áreas de menor concentração.

5.2. Hidrogeoquímica das águas subterrâneas do setor de Seia – Torre – Covilhã

5.2.1. Parâmetros físico-químicos

Relativamente às águas subterrâneas normais, as análises referentes à hidrogeoquímica convencional abrangem as seguintes determinações:

- Parâmetros físico-químicos: temperatura, pH e condutividade elétrica;
- Iões maioritários: sódio (Na^+), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-) e cloreto (Cl^-);
- Constituinte não iónico: sílica (SiO_2).

Autores como Moore (2002) defendem que a amostragem de águas subterrâneas é mais complexa do que a mera recolha de uma porção de água, o seu armazenamento num recipiente de amostragem e o envio para um laboratório para análise. Este tipo de amostragem tem que ser representativa das condições *in situ* (Moore, 2002). Assim, os parâmetros físico-químicos devem ser determinados diretamente no local de emergência das águas subterrâneas com recurso a medidores portáteis.

Numa dada região ou área de estudo, as águas subterrâneas com circulação pouco profunda acompanham a evolução das temperaturas médias mensais do ar, de tal forma que a sua medição deve ser realizada *in situ*, diretamente no ponto de emergência. A grandes profundidades a temperatura da água sofre influência do

gradiente geotérmico, aumentando cerca de 1 °C por cada 33 metros de profundidade (Custódio & Llamas, 1996).

Parâmetros físico-químicos como o pH, a condutividade elétrica e o resíduo seco, são habitualmente determinados *in situ* por um medidor portátil, cuja sonda é colocada num recipiente com água colhida no local de emergência.

O pH das águas subterrâneas geralmente varia entre 6,5 e 8,0 podendo, mais raramente, variar entre 5,5 e 8,5. Segundo Rogers (2003), a medição do pH é essencial em todas as investigações hidrológicas, pois a compreensão do seu comportamento é fundamental para o estudo dos processos de contaminação e de interação água – rocha, constituindo um parâmetro essencial em modelação hidrogeoquímica.

A condutividade elétrica define a capacidade que a água tem de conduzir a corrente elétrica (ex. Custódio & Llamas, 1996; Hudak, 2001). Esta propriedade está diretamente relacionada com o teor de sais dissolvidos na água, ou seja, quanto mais mineralizada for a água, maior a sua condutividade elétrica. Também a temperatura influencia esta propriedade, por isso deve-se tomar como temperatura de referência os 25°C, uma vez que a condutividade elétrica aumenta 2%/°C. Para águas doces, a 18°C, a condutividade elétrica varia entre 100 e 2000 µS/cm (Custódio & Llamas, 1996).

Os valores de temperatura, pH e condutividade elétrica dos pontos de amostragem do setor Seia-Torre-Covilhã, foram medidos *in situ*, nos meses de Maio, Setembro e Dezembro de 2010, Abril, Junho, Setembro e Dezembro de 2011 e Julho de 2012. No quadro 5.1 estão registados os valores médios e coeficiente de variação destes parâmetros relativos aos pontos de amostragem. Nas figuras 5.2 a 5.4, está representada a evolução temporal dos mesmos parâmetros para cada uma das nascentes consideradas.

No anexo II encontram-se os registos das medições efetuadas *in situ* para todos os pontos de amostragem em cada uma das campanhas realizadas.

Quadro 5. 1. Valores de temperatura, pH e condutividade elétrica das águas subterrâneas, medidos *in situ*.

Ponto de Água	Litologia	Temperatura		pH		Condutividade elétrica	
		M (°C)	CV (%)	M	CV (%)	M (μS/cm)	CV (%)
Fonte Santa	Granito de Seia	12,9	6	5,32	6	27	50
Fonte da Biquinha	Granito da Covilhã	13,7	12	5,06	5	31	41
Mina da Rosa Negra	Granito da Covilhã	12,4	7	5,58	8	26	45
Fonte das Penhas da Saúde	Granito da Covilhã	12,2	25	5,14	5	21	39
Fonte da Saibreira	Granito da Estrela	11,1	30	5,55	6	6	66
Fonte da Nave de Santo António Sul	Depósitos glaciários e fluviários	8,6	16	5,89	5	39	22
Fonte do Espinhaço de Cão	Granito da Covilhã	9,9	32	6,13	7	287	12
Fonte do Covão do Boi	Granito da Covilhã	10,3	45	6,12	7	11	75
Mina da Torre	Granito da Estrela	9,1	58	6,05	7	454	44
Fonte dos Perús	Granito da Estrela	9,1	21	5,40	4	7	100
Nascente da Lagoa Comprida	Granito de Seia	8,6	30	5,30	6	123	51
Fonte do Covão do Curral	Granito do Covão do Curral	12,7	38	6,60	4	15	90
Fonte do Ferreiro	Granito de Seia	13,2	10	5,70	5	49	23
Fonte de S. Tomé	Granito de Seia	13,1	10	5,80	7	49	34
Fonte do Marrão	Granito de Seia	13,9	12	6,10	6	58	14

Nota: média (M) e coeficiente de variação (CV) dos valores medidos entre Maio de 2010 e Julho de 2012.

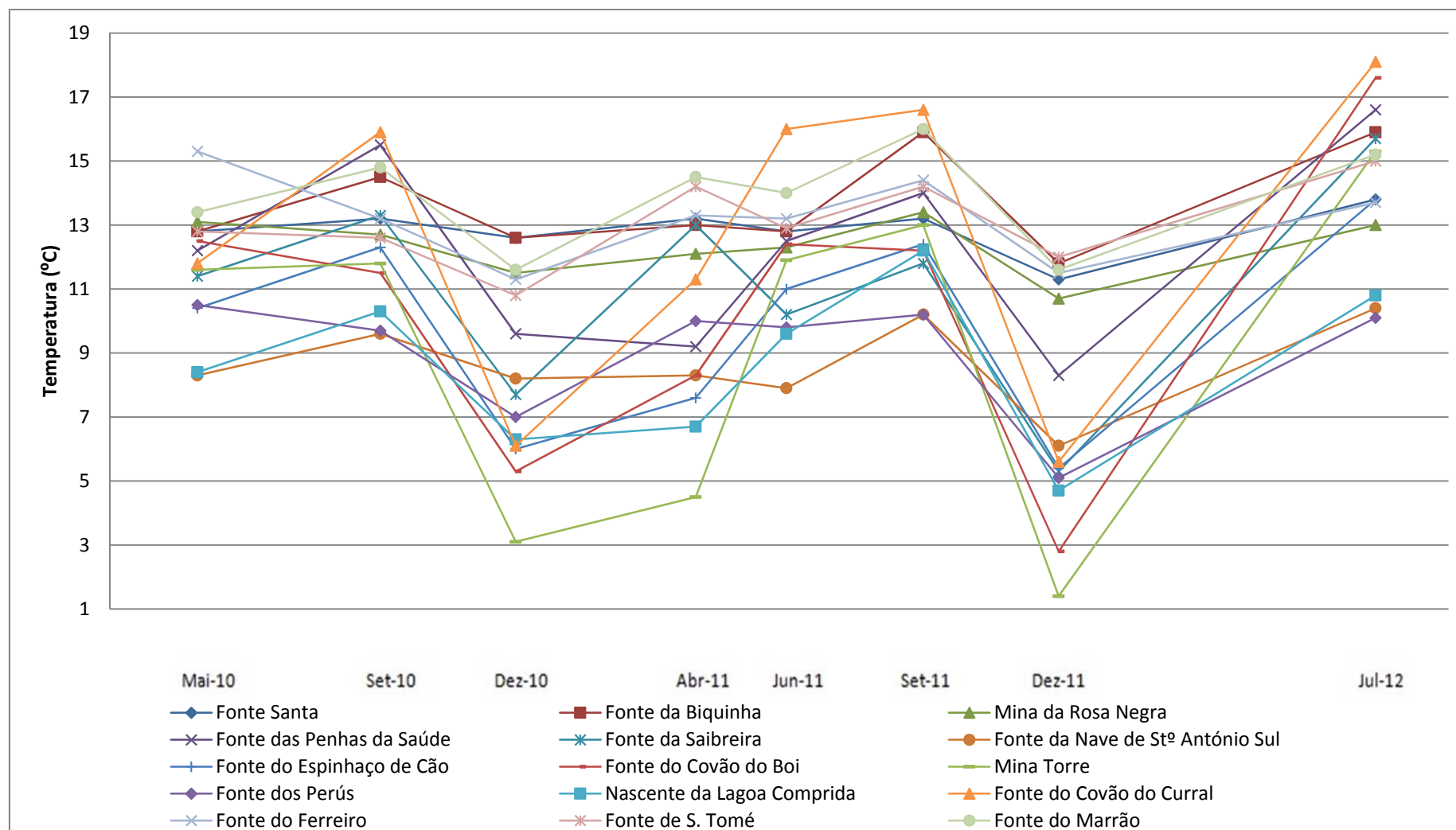


Fig. 5.2. Evolução temporal da temperatura da água subterrânea entre Maio de 2010 e Julho de 2012.

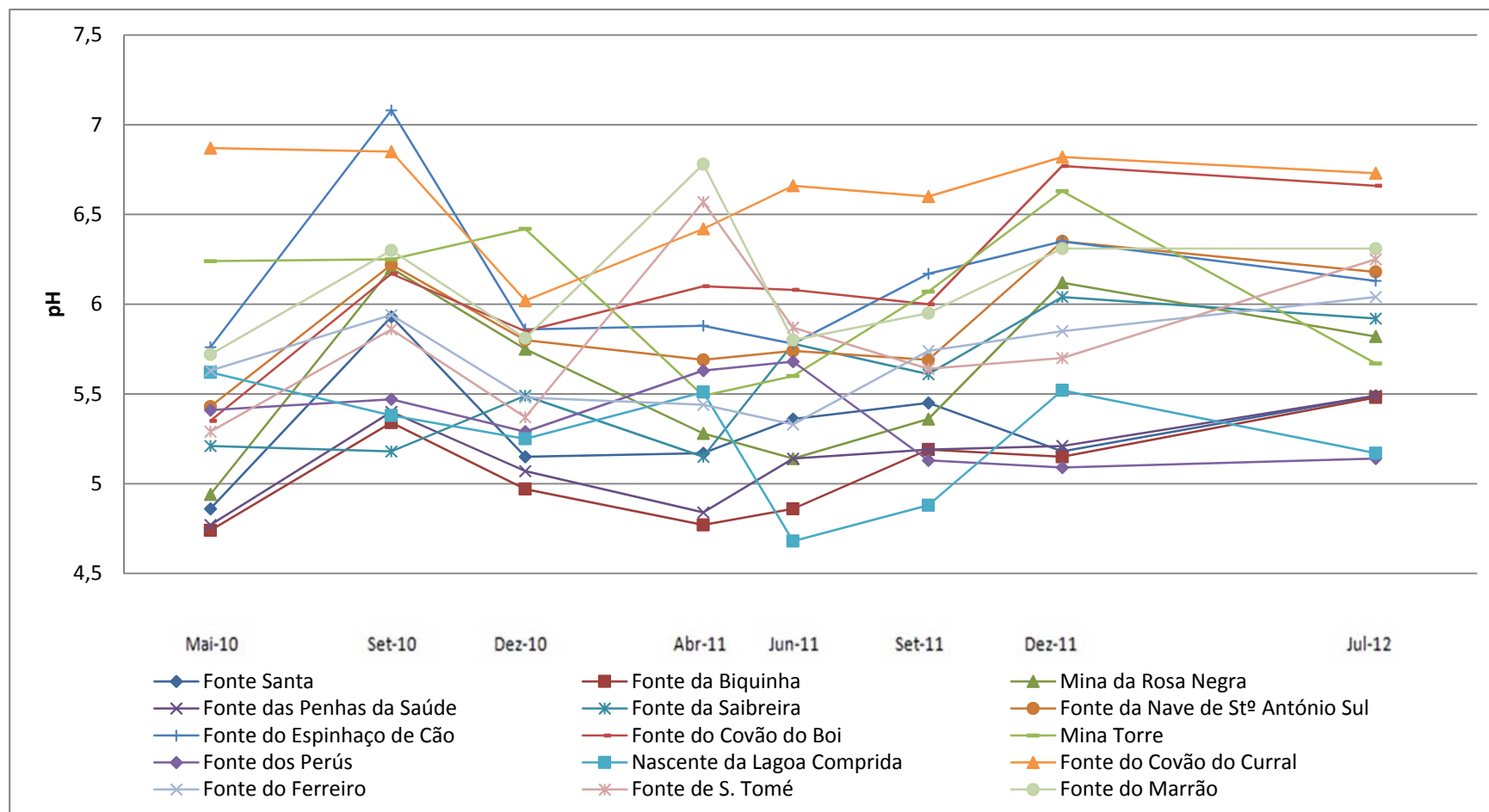


Fig. 5.3. Evolução temporal do pH da água subterrânea entre Maio de 2010 e Julho de 2012.

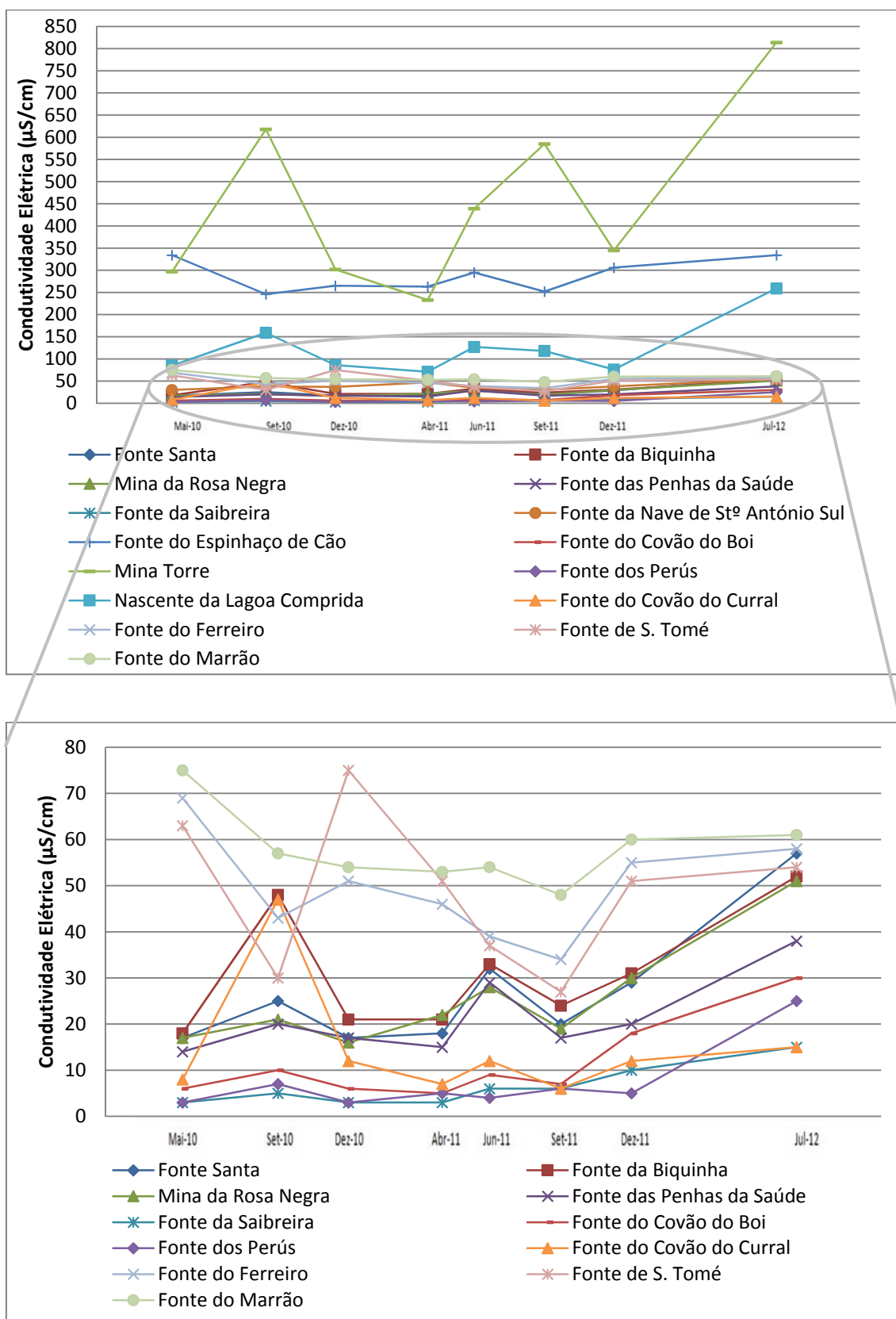


Fig. 5.4. Evolução temporal da condutividade elétrica de todos os pontos de água subterrânea entre Maio de 2010 e Julho de 2012 (em cima); evolução temporal da condutividade elétrica dos pontos de água subterrânea menos mineralizados entre Maio de 2010 e Julho de 2012 (em baixo).

A figura 5.2 representa a evolução temporal da temperatura da água subterrânea durante o período de estudo. O tipo de circulação da água no aquífero ao longo do ciclo anual é refletido pela variação da sua temperatura. Em termos gerais, nascentes associadas a uma circulação mais superficial tendem a apresentar temperaturas que acompanham a evolução das temperaturas médias mensais do ar, apresentando coeficientes de variação, relativamente à média, elevados. Já nascentes associadas a uma circulação mais profunda tendem a apresentar temperaturas mais estáveis ao longo do ano, resultando daí menores coeficientes de variação.

Assim, tendo em conta os dados do quadro 5.1, supõe-se que as nascentes da Mina da Torre, com coeficiente de variação (CV) de 58%, da Fonte do Covão do Boi, com CV de 45% e da Fonte do Covão do Curral, com CV de 38% estejam associadas a uma circulação mais superficial quando comparadas com as demais nascentes. Já as nascentes da Fonte Santa e da Mina da Rosa Negra, com os coeficientes mais baixos de 6% e 7%, respetivamente, estarão associadas a zonas de circulação mais profunda.

O gráfico da figura 5.2 permite verificar que, apesar dos contrastes descritos no parágrafo anterior, a temperatura das águas subterrâneas estudadas acompanha a variação da temperatura do ar ao longo do ciclo anual. É, ainda, de referir que todas as nascentes abrangidas por este estudo apresentam temperatura de emergência inferior a 25 °C, sendo todas elas consideradas hipotermiais segundo a classificação de Fraústo da Silva & Vaz (1988). Assim sendo, é de supor que todas as nascentes estejam associadas a uma circulação pouco profunda, o que é concordante com a ausência de manifestações de artesianismo e com as características hidrogeoquímicas apresentadas neste capítulo.

Na generalidade, os valores de pH médios registados nas nascentes consideradas são inferiores a 7 (quadro 5.1.), verificando-se apenas um valor

ligeiramente superior na campanha de amostragem de Setembro de 2010 na Fonte do Espinhaço de Cão (fig. 5.3). O valor de pH médio mais baixo foi registado no ponto de amostragem Fonte da Biquinha (5,06), registando-se o valor mais elevado na Fonte do Covão do Curral (6,6). O coeficiente de variação dos valores de pH apresenta valores relativamente reduzidos, entre 4 e 8 %.

A condutividade elétrica média das nascentes do SSTC varia entre $6\mu\text{S}/\text{cm}$, na Fonte da Saibreira, e $454\mu\text{S}/\text{cm}$, da Mina da Torre (quadro 5.1). Este parâmetro apresenta um coeficiente de variação inferior a 50% na maioria dos pontos amostrados, registando, contudo, valores de 100% e 90% nas nascentes Fonte dos Perús e Fonte do Covão do Curral, respetivamente. Os valores médios da condutividade elétrica são inferiores a $100\mu\text{S}/\text{cm}$, exceto nos casos de águas contaminadas: Fonte do Espinhaço de Cão, Mina da Torre e Nascente da Lagoa Comprida (fig. 5.4; ver Capítulo 7). É de notar que valores de condutividade até $100\mu\text{S}/\text{cm}$ estão associados a águas hipossalinas (com mineralização total inferior a 200 mg/L , segundo a classificação de Curto Simões 1993).

No quadro 5.2 estão registados os teores médios dos iões maiores para o período de Inverno, que englobam as campanhas de Maio e Dezembro de 2010 e Abril e Dezembro de 2011, e de Verão, nos quais são tidos em conta os teores medidos nas campanhas de Setembro de 2010, Junho e Setembro de 2011 e Julho de 2012. No mesmo quadro está também registado o teor médio de sílica medido ao longo de todas as campanhas.

No Anexo III encontra-se o registo dos teores dos componentes maiores para cada uma das campanhas de amostragem realizadas.

Quadro 5. 2. Teores médios dos iões maioritários e sílica para as campanhas de Inverno e Verão.

Ponto de Água	Na ⁺ (mg/L)		K ⁺ (mg/L)		Ca ²⁺ (mg/L)		Mg ²⁺ (mg/L)		HCO ₃ ⁻ (mg/L)		SO ₄ ²⁻ (mg/L)		Cl ⁻ (mg/L)		SiO ₂ (mg/L)
	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	
Fonte Santa	4,0	3,3	0,6	0,7	1,1	1,5	0,5	0,4	5,8	6,3	2,5	1,7	3,3	2,2	11,0
Fonte da Biquinha	4,6	4,0	0,6	0,6	1,2	1,4	0,4	0,4	4,2	6,3	2,2	1,1	6,4	4,8	8,4
Mina da Rosa Negra	4,7	4,4	0,9	0,9	1,1	1	0,4	0,3	5,2	5,8	1,5	0,2	5,5	5,7	9,3
Fonte das Penhas da Saúde	2,9	2,6	0,5	0,6	1,3	1,7	0,3	0,3	3,4	5,3	2,0	0,9	3,7	2,9	5,0
Fonte da Saibreira	2,6	1,9	0,5	0,5	0,4	0,5	0,2	0,2	3,2	4,5	1,4	0,2	2,2	1,1	6,9
Fonte da Nave de Santo António Sul	8,6	7,4	0,6	0,7	0,8	0,8	0,2	0,2	3,4	4,8	1,5	0,5	12,3	10,3	7,0
Fonte do Espinheiro de Cão	32,4	22,2	1,1	1,0	21,5	23,5	2,7	3,2	4,2	4,8	1,9	0,7	91,3	80,3	17,5
Fonte do Covão do Boi	2,0	2,5	0,5	0,4	1	0,9	0,2	0,2	4,4	5,8	2,4	0,5	2,6	1,3	10,0
Mina da Torre	43,3	92,3	0,9	1,8	13,0	25,3	0,6	1,3	23,8	20	6,0	8,4	69,3	164	4,0
Fonte dos Perús	2,1	1,9	0,3	0,5	0,4	0,6	0,2	0,2	2,2	3,8	1,6	0,5	2,3	1,8	3,4
Nascente da Lagoa Comprida	14,9	25,1	0,6	0,6	1,5	3,3	0,4	0,8	2,2	3,3	2,5	1,2	23,5	45,5	4,6
Fonte do Covão do Curral	3,0	2,9	0,5	0,7	1	1,7	0,3	0,4	3,2	4,3	2,4	4,0	3,1	2,1	7,6
Fonte do Ferreiro	6,9	4,7	3,5	2,3	2,7	2,2	1,2	0,7	3,7	4,0	3,4	2,2	7,2	4,8	11,3
Fonte de S. Tomé	7,9	5,1	2,4	1,5	1,9	1,3	0,6	0,5	3,0	4,3	4,1	2,5	9,2	5,2	11,0
Fonte do Marrão	7,6	6,9	1,2	1,1	2,8	2,5	1,1	1,1	6,5	6,0	6,2	5,0	7,9	6,3	15,0

A análise do quadro 5.2 permite verificar que, na maior parte dos casos, se registou uma ligeira diminuição dos teores de Na^+ do período de Inverno para o de Verão. Constituem exceção a esta tendência as águas da Fonte do Covão do Boi, da Mina da Torre e da Nascente da Lagoa Comprida. Uma vez que a Fonte do Covão do Boi é uma água com baixa mineralização, flutuações deste tipo podem ser consideradas normais. Já as águas da Mina da Torre e da Nascente da Lagoa Comprida são bastante mais mineralizadas, de forma que o aumento acentuado dos teores de Na^+ do período de Inverno para o de Verão, poderá ser devido à entrada deste catião no sistema aquífero por influência de causas antrópicas a abordar no capítulo 7.

Relativamente aos catiões K^+ e Mg^{2+} , observa-se que os teores correspondentes ao período de Inverno e Verão apresentam pequenas flutuações. O único ponto que merece destaque corresponde, mais uma vez, à Mina da Torre, na qual os teores desses iões mais que duplicaram dos meses de Inverno para os de Verão. Uma possível explicação para esta ocorrência poderá estar associada a uma origem antrópica, sendo esta análise realizada também no capítulo 7.

Também no caso do catião Ca^{2+} se verifica uma ligeira flutuação dos teores nos meses de Inverno e Verão e mais uma vez, se verifica que o ponto de amostragem Mina da Torre assume um comportamento semelhante ao até aqui referido. As águas da Mina da Torre e da Nascente da Lagoa Comprida quase que duplicam o teor de Ca^{2+} entre um e outro período de referência. Será, portanto, de supor que ocorra também uma entrada de Ca^{2+} no sistema, potencialmente de origem antrópica.

Tomando em atenção os teores do anião HCO_3^- , verifica-se que as flutuações ocorridas entre os dois períodos considerados são ligeiras para todos os pontos de amostragem, não existindo nenhum que mereça especial destaque.

No caso do anião SO_4^{2-} em quase todos os casos a sua variação está marcada por uma diminuição do período de Inverno para o de Verão. No entanto, esta tendência inverte-se no caso da Fonte do Covão do Curral e na Mina da Torre (onde a origem do ião sulfato poderá ser, em parte, de origem antrópica — ver capítulo 7).

No que respeita ao comportamento do anião Cl^- observa-se, à semelhança do ião Na^+ , uma diminuição de concentração nos meses de Verão, constituindo exceção significativa as águas da Mina da Torre e da Nascente da Lagoa Comprida. Mais uma vez, a origem para esta situação deverá estar relacionada com causas antrópicas, a tratar no capítulo 7.

Os teores de sílica são considerados normais para águas deste tipo, tendo em conta a natureza da litologia em que se inserem os sistemas aquíferos.

Com o gráfico da figura 5.5 pretende-se ter a noção da proximidade entre a área de recarga e o local de emergência da água subterrânea para cada ponto de água. Assinalados com uma elipse, encontram-se os pontos de água Fonte do Espinhaço de Cão, Mina da Torre e Nascente da Lagoa Comprida que se pensa estarem contaminados por substâncias de origem antrópica, pelo que não serão tidos em conta para este efeito.

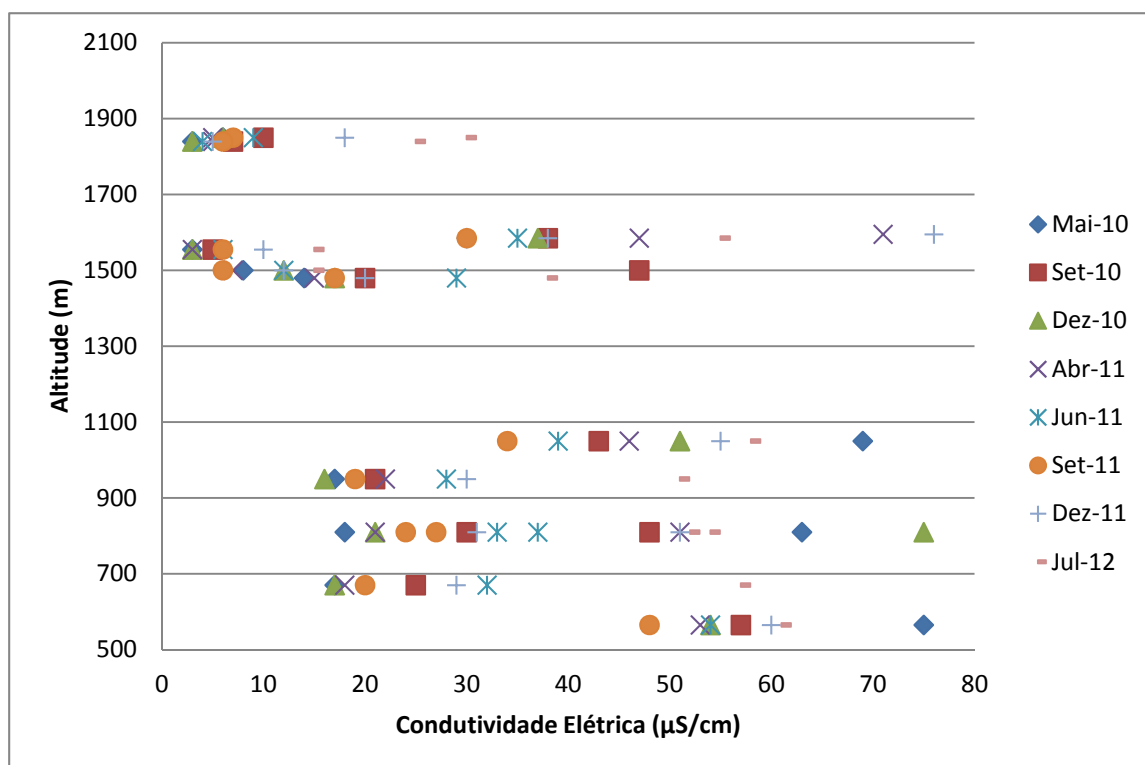
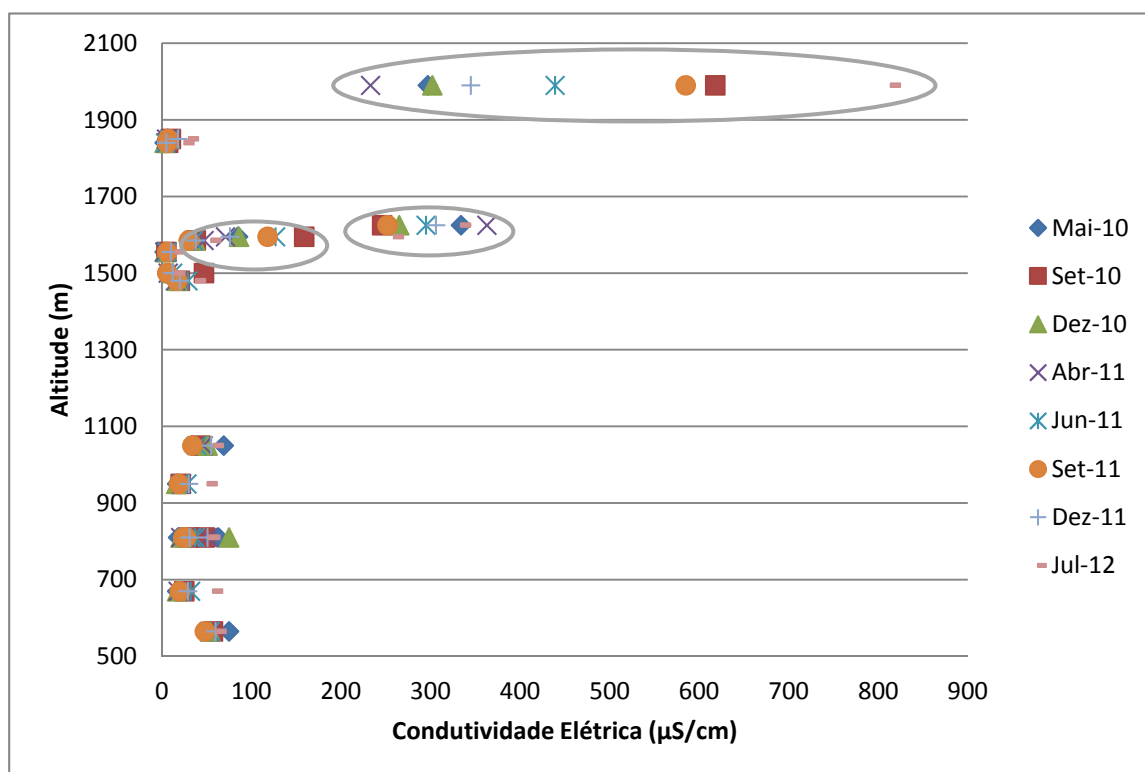


Fig. 5.5. Relação entre a condutividade elétrica e a altitude de todos os pontos de água entre Maio de 2010 e Julho de 2012 (em cima); relação entre a condutividade elétrica e a altitude dos pontos de água com menor mineralização entre Maio de 2010 e Julho de 2012 (em baixo).

Tendo em conta que, quanto maior a proximidade entre a área de recarga e a área de descarga, menor a mineralização total e, conseqüentemente, a condutividade elétrica da água subterrânea, pode-se verificar que para a totalidade dos pontos considerados (excluindo os potencialmente contaminados) a área de recarga se encontra próxima do local de emergência. Daqui resultam reduzidos trajetos de circulação e tempos de residência e interação água-rocha pouco significativos. Assim, as águas subterrâneas amostradas tendem a ser bastante representativas da água de precipitação local.

Com base nos resultados analíticos relativos às águas subterrâneas do setor de Seia-Torre-Covilhã, foram calculadas correlações com o intuito de melhor se entender o funcionamento do sistema hidrogeológico (quadro 5.3).

No quadro 5.3 são considerados os teores médios em íões maiores, a condutividade elétrica e a altitude das nascentes com exceção da Fonte do Espinhaço de Cão, Mina da Torre e Nascente da Lagoa Comprida por se pensar estarem contaminados por substâncias de origem antrópica.

A condutividade elétrica exhibe correlações muito fortes com os teores dos íões maioritários: sódio (0,96); cloreto (0,92); magnésio (0,90) e cálcio (0,89). Apesar de mais fraca, é de notar, também, a correlação com os íões sulfato (0,75) e potássio (0,74).

A correlação negativa entre os teores das principais espécies químicas e a altitude de emergência (Na^+ (-0,77), K^+ (-0,40), Ca^{2+} (-0,62), Mg^{2+} (-0,66), HCO_3^- (-0,61), SO_4^{2-} (-0,64) e Cl^- (-0,78)), explica-se, pela maior interação água-rocha nas zonas menos elevadas do sistema hidrogeológico, a qual resulta, simultaneamente, de circuitos mais longos e da presença de rochas mais meteorizadas.

A boa correlação entre as espécies químicas sódio e cloreto (0,95) poderá resultar da interação água-rocha. Assim, o sódio poderá ter origem na hidrólise das plagioclases, e o cloro na alterações de micas como a biotite, onde possa estar presente como constituinte menor (Albu *et al.*, 1997), ou associado à mobilização nas cloroapatites presentes nos granitos (ex. Neiva, 1982). Contudo, dado estarmos a lidar com águas de circulação pouco profunda, a correlação Na-Cl poderá estar apenas relacionada com a assinatura da composição química das águas meteóricas locais.

O elevado coeficiente de correlação do sódio e cálcio (0,89), pode estar relacionado com processos de hidrólise das plagioclases.

A correlação entre sódio e magnésio (0,86) poderá ter origem, mais uma vez, na interação água-rocha, estando o sódio relacionado com a hidrólise das plagioclases sódicas e o magnésio com a alteração das biotites (Gilkes & Suddhiprakarn, 1979).

Por fim, é de salientar também a elevada correlação entre cálcio e magnésio (0,95), potencialmente originada pela dissolução de minerais como biotite, anfíbolos e piroxenas.

Quadro 5. 3. Matriz de correlações entre valores de condutividade elétrica, teores de iões maiores e altitude para as águas não contaminadas.

	Condutividade Elétrica	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Altitude
Condutividade Elétrica	1								
Na ⁺	0,96	1							
K ⁺	0,74	0,71	1						
Ca ²⁺	0,89	0,82	0,66	1					
Mg ²⁺	0,90	0,86	0,66	0,95	1				
HCO ₃ ²⁻	0,34	0,31	-0,19	0,34	0,35	1			
SO ₄ ²⁻	0,75	0,73	0,31	0,76	0,75	0,36	1		
Cl ⁻	0,92	0,95	0,66	0,73	0,76	0,27	0,67	1	
Altitude	-0,81	-0,77	-0,40	-0,62	-0,66	-0,61	-0,64	-0,78	1

5.2.2. Facies hidrogeoquímicas

Uma importante tarefa na investigação hidrogeoquímica das águas subterrâneas é a conveniente análise e apresentação visual dos dados. Para esse propósito são utilizados comumente os seguintes métodos gráficos (Freeze & Cherry, 1979):

- **Diagrama de Stiff:** é um diagrama hidrogeoquímico que representa graficamente, em meq/L, a concentração dos cátions $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , e Mg^{2+} e dos ânions Cl^- , HCO_3^- e SO_4^{2-} , sobre 3 retas paralelas, horizontais e igualmente espaçadas entre si, cortadas por uma reta normal, obtendo-se, de um lado, o campo dos cátions e, do outro, o dos ânions. Através da ligação das extremidades destas 3 retas obtém-se um polígono característico para cada uma das águas analisadas (fig. 5.6), proporcionando, assim, uma rápida comparação entre diferentes análises químicas (Freeze & Cherry, 1979).

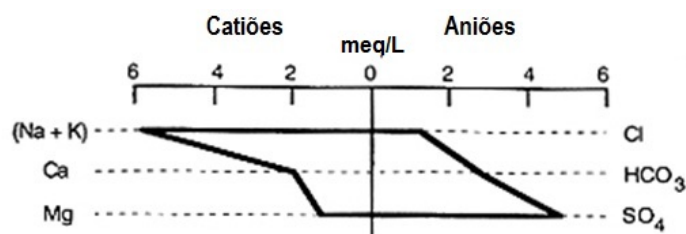


Fig. 5.6. Diagrama de Stiff (adaptado de Fetter, 2001).

- **Diagrama de Piper:** diagrama trilinear que representa o resultado de análises químicas de águas. Os valores dos ânions e cátions de uma análise, expressos em %meq/L, são projetados em dois triângulos separados, existindo ainda um campo central em forma de losango, onde se representam um terceiro ponto obtido a partir da projeção dos pontos assinalados nos dois triângulos (fig. 5.7).

Este tipo de diagrama serve para comparar e classificar distintos grupos de águas relativamente aos iões dominantes.

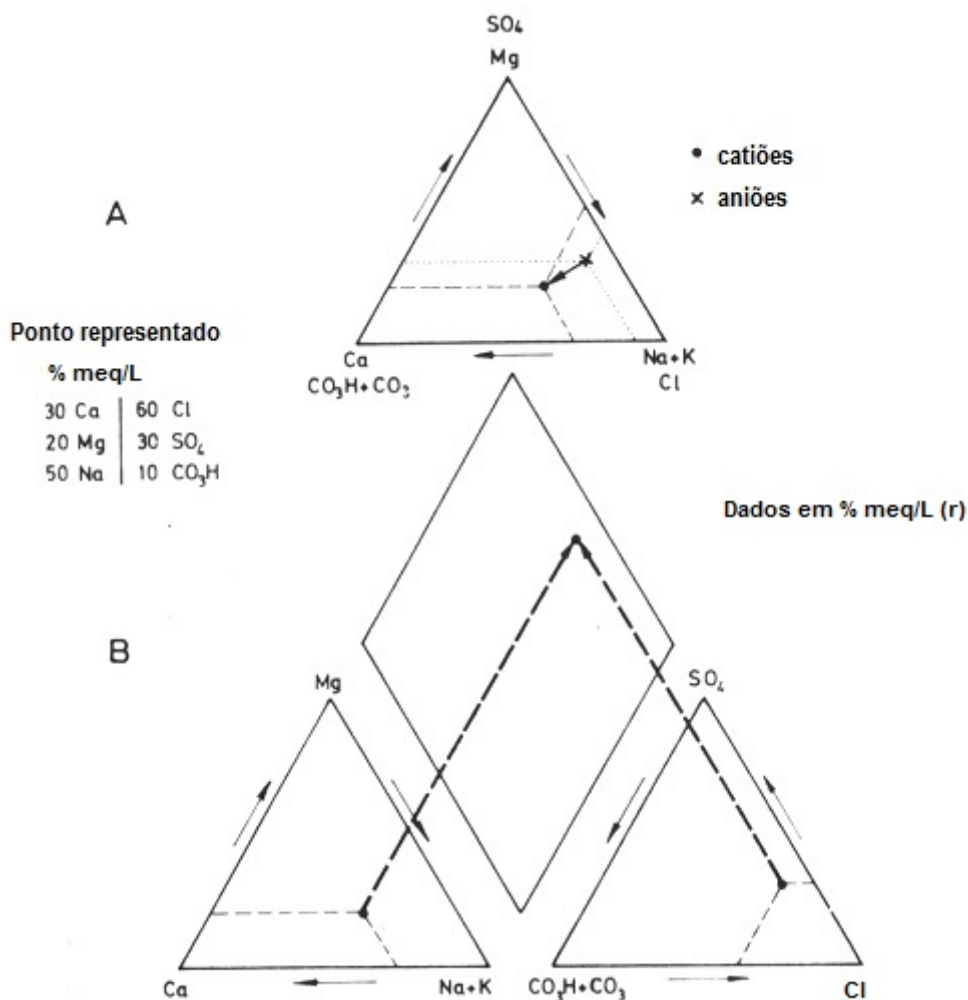


Fig. 5.7. Diagrama de Piper (adaptado de Custódio & Llamas, 1996).

- **Diagrama de Schoeller-Berkaloff:** diagrama, cujas concentrações nos diversos iões, expressas em meq/L, são representadas em escala semilogarítmica. Este tipo de diagramas permitem aumentar ou diminuir o número de espécies químicas representadas segundo as necessidades e objetivos da interpretação (fig. 5.8).

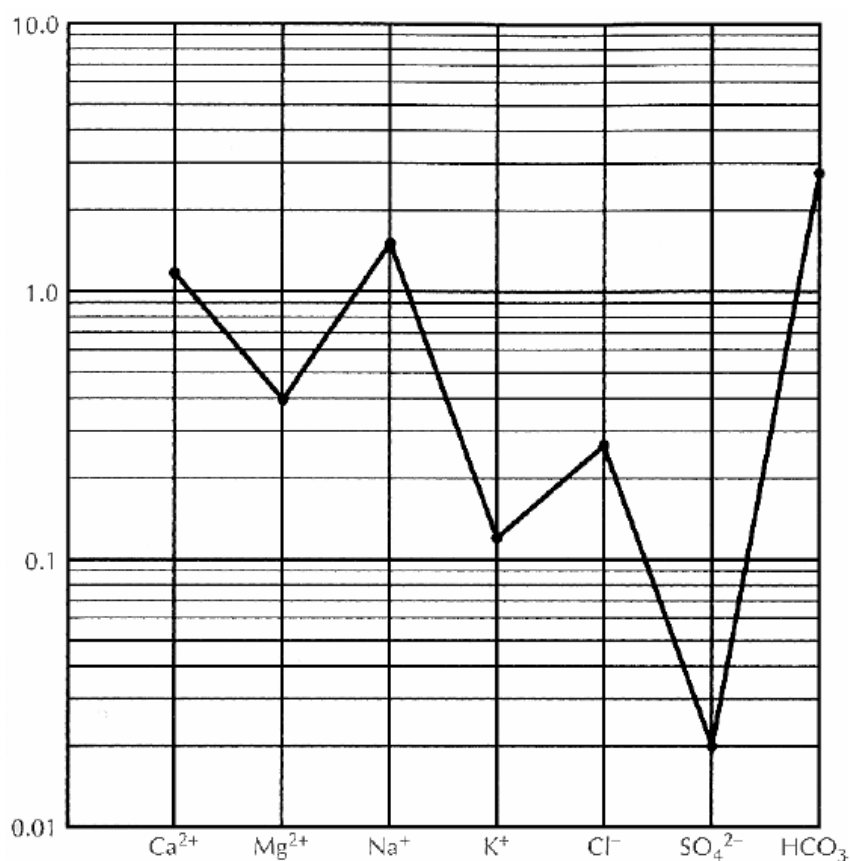


Fig. 5.8. Diagrama semilogarítmico de Schoeller-Berkaloff (extraído de Fetter, 2001).

De acordo com Freeze & Cherry (1979), os diagramas anteriormente apresentados, para além de permitirem realizar uma análise e apresentação visual conveniente dos dados obtidos, são também necessários para permitir uma conveniente identificação das categorias de águas subterrâneas analisadas de acordo com a sua composição. Com efeito, o diagrama de Piper poder ser utilizado para se agrupar águas de composição semelhante (fig. 5.9), de acordo com o conceito de *facies* hidroquímica desenvolvido por Back (1961, 1966), Morgan & Winner (1962), e Seaber (1962).

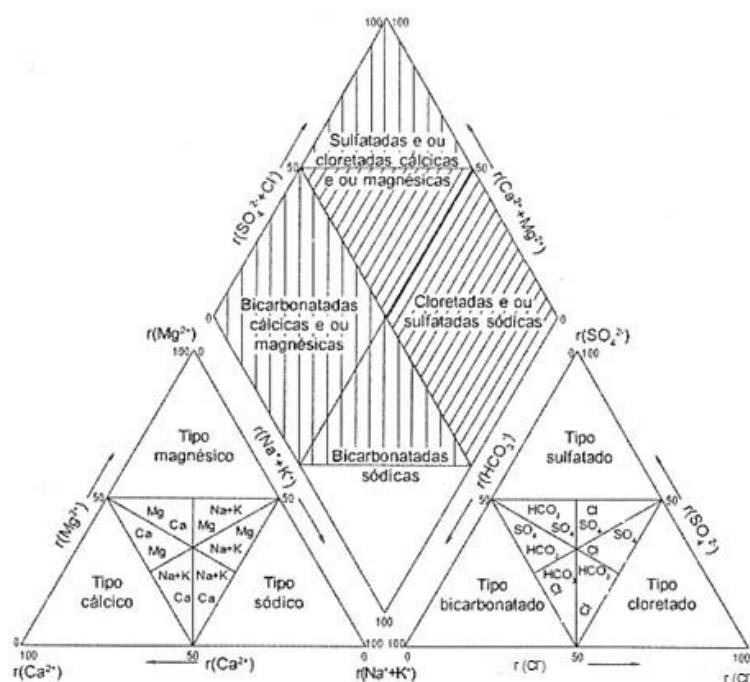


Fig. 5.9. *Facies hidroquímicas* (adaptado de IGM, 1999).

As águas subterrâneas do setor de Seia-Torre-Covilhã apresentam, em geral, fraca mineralização, constituindo exceções as águas da Fonte do Espinhaço de Cão, e da Mina da Torre e em menor medida, as da Fonte da Nave de Santo António Sul e Nascente da Lagoa Comprida tal como se pode observar nos diagramas das figura 5.10 e 5.12.

Os diagramas de Stiff (fig. 5.10) refletem de forma bastante evidente as principais feições das águas subterrâneas normais do SSTC. Por um lado, as águas não contaminadas são fracamente mineralizadas e apresentam diversas *facies* hidrogeoquímicas, tal como se discute de seguida. Sobressaem, ainda, as exceções atrás apontadas, as quais se supõe resultarem de contaminação resultante da limpeza da neve e gelo nas estradas.

Relativamente à classificação das águas do setor em estudo, observa-se que a *facies* hidrogeoquímica predominante é a clorada-sódica, ocorrendo também as *facies* bicarbonatada-sódica e clorada-cálcica (fig. 5.10 e 5.11).

Quando comparados os períodos de Inverno e Verão (quadro 5.4), apenas quatro nascentes apresentam diferentes *facies*: a Fonte Santa, Fonte da Saibreira e Fonte do Covão do Boi, cuja *facies* é cloretada-sódica, no Inverno, e bicarbonatada-sódica no Verão, e a Fonte de Espinhaço de Cão que é cloretada-sódica, no Inverno, e cloretada-cálcica no Verão (fig. 5.10 e 5.11). Uma vez que as águas emergentes na Fonte Santa, Fonte da Saibreira e Fonte do Covão do Boi são pouco mineralizadas e que os teores de cloreto e bicarbonato são semelhantes nos dois períodos, a ocorrência de alteração de *facies* hidrogeoquímicas poderá dever-se a flutuações naturais dos teores dos iões em causa. Quanto à Fonte de Espinhaço de Cão as variações de *facies* poderão resultar da conjugação de processos naturais e processos antrópicos (contaminação).

Quadro 5. 4. *Facies* hidrogeoquímicas das águas do setor de Seia-Torre-Covilhã.

Ponto de água	<i>Facies</i> hidrogeoquímica	
	Média Inverno	Média Verão
Fonte Santa	Cloretada sódica	Bicarbonatada sódica
Fonte da Biquinha	Cloretada sódica	Cloretada sódica
Mina da Rosa Negra	Cloretada sódica	Cloretada sódica
Fonte das Penhas da Saúde	Cloretada sódica	Cloretada sódica
Fonte da Saibreira	Cloretada sódica	Bicarbonatada sódica
Fonte da Nave de Santo António Sul	Cloretada sódica	Cloretada sódica
Fonte do Espinhaço de Cão	Cloretada sódica	Cloretada cálcica
Fonte do Covão do Boi	Cloretada sódica	Bicarbonatada sódica
Mina da Torre	Cloretada sódica	Cloretada sódica
Fonte dos Perús	Cloretada sódica	Cloretada sódica
Nascente da Lagoa Comprida	Cloretada sódica	Cloretada sódica
Fonte do Covão do Curral	Cloretada sódica	Cloretada sódica
Fonte do Ferreiro	Cloretada sódica	Cloretada sódica
Fonte de S. Tomé	Cloretada sódica	Cloretada sódica
Fonte do Marrão	Cloretada sódica	Cloretada sódica

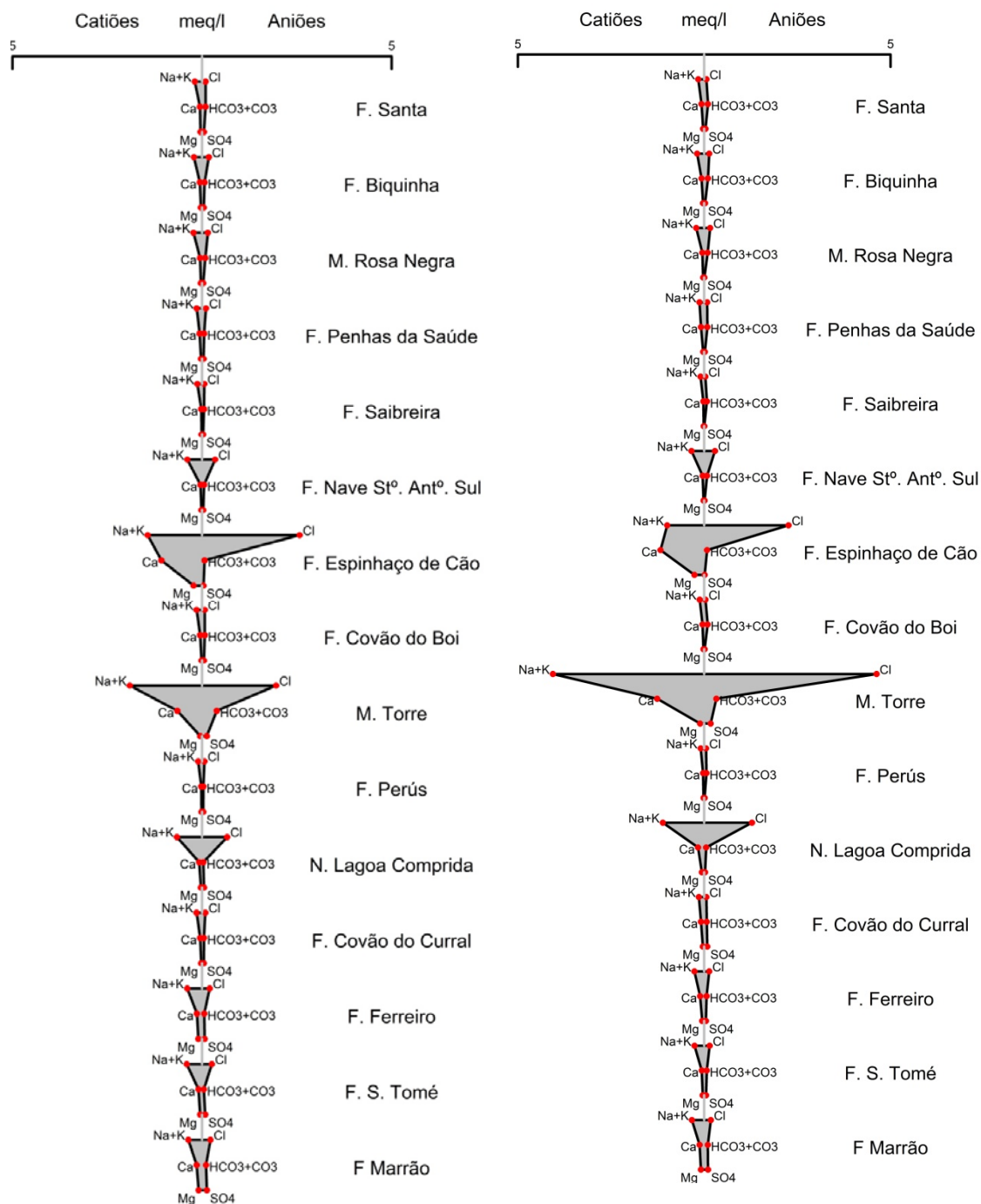


Fig. 5.10. Diagrama de Stiff com a média das campanhas de Inverno à esquerda e média das campanhas de Verão à direita.

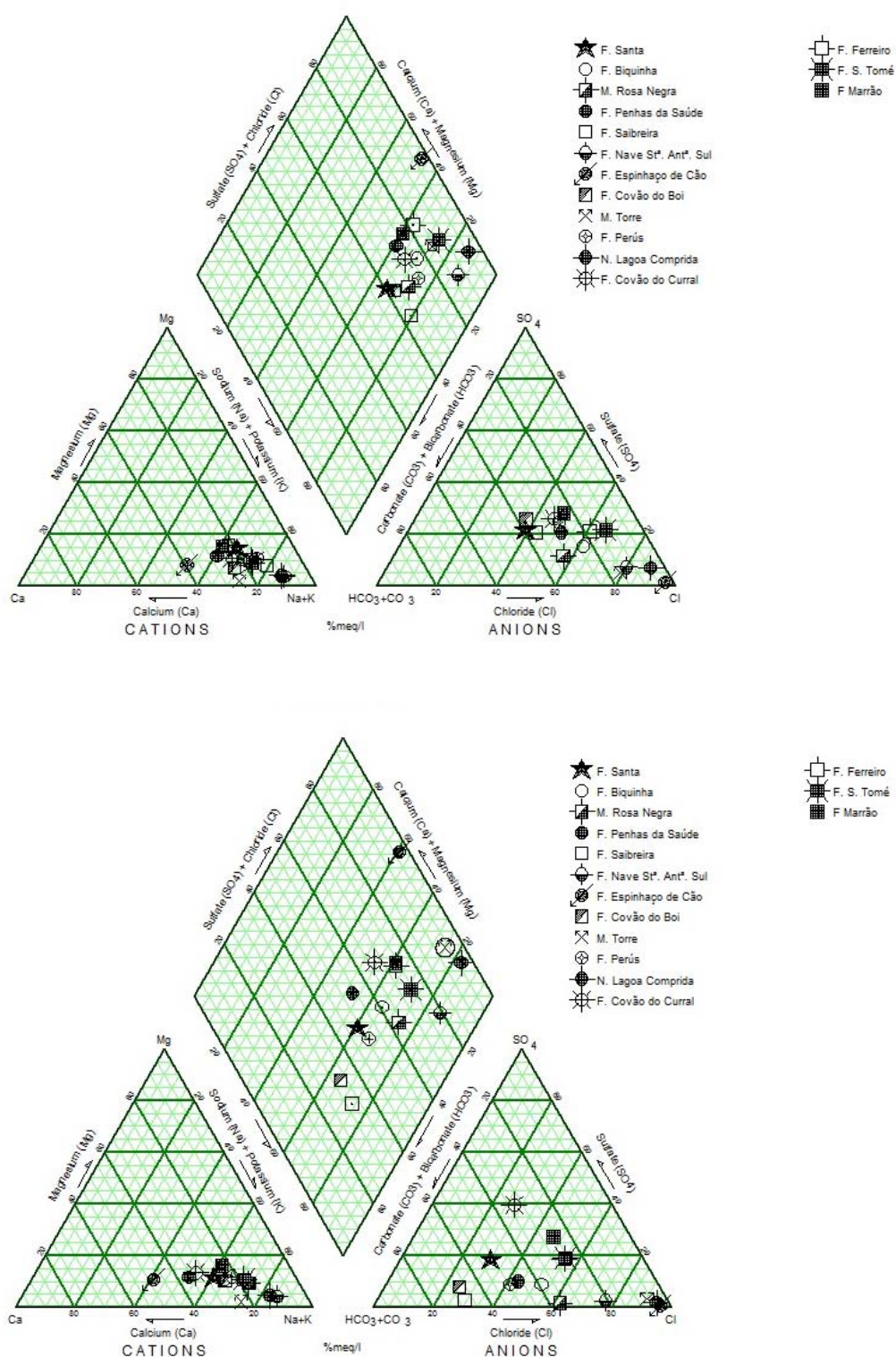


Fig. 5.11. Diagramas de Piper relativos às médias das amostragens de Inverno (em cima), e de Verão (em baixo).

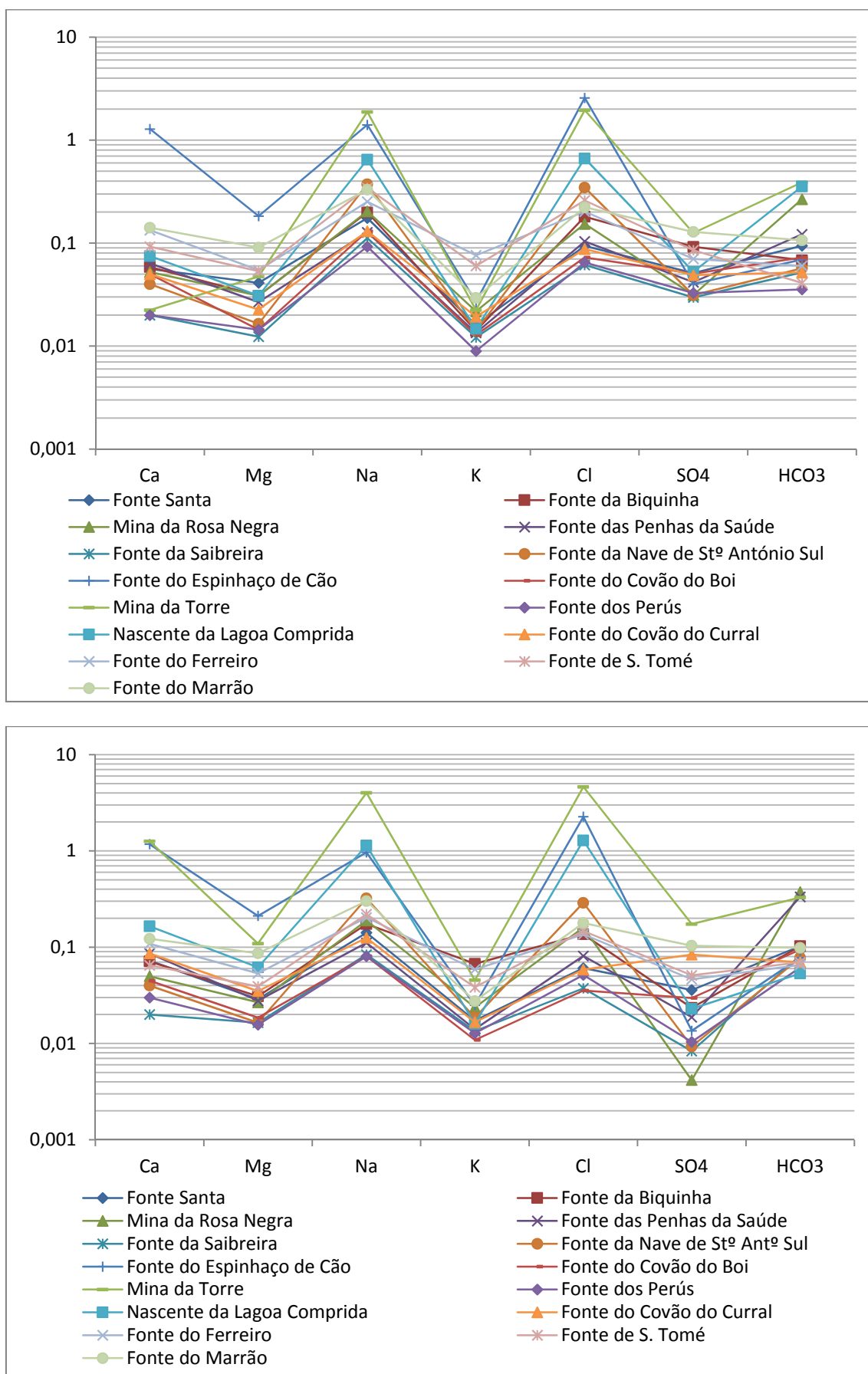


Fig. 5.12. Diagramas de Schoeller-Berkaloff relativos às médias de Inverno (em cima) e Verão (em baixo).

Na figura 5.13. encontra-se o mapa hidrogeoquímico do setor, no qual se indica a localização dos pontos de água e se representam os respectivos diagramas de Stiff. Esta representação cartográfica ilustra e sintetiza de modo bastante claro a informação hidrogeoquímica apresentada neste capítulo. Em particular, são de destacar os seguintes aspetos:

- As águas subterrâneas normais não contaminadas são fracamente mineralizadas.
- Nas águas referidas no ponto anterior, há tendência para a mineralização diminuir com o aumento da altitude.
- As águas subterrâneas normais contaminadas são mais mineralizadas e ocorrem nas zonas mais elevadas da montanha, onde a limpeza da neve é mais frequente.
- Predomina a *facies* cloretada-sódica.

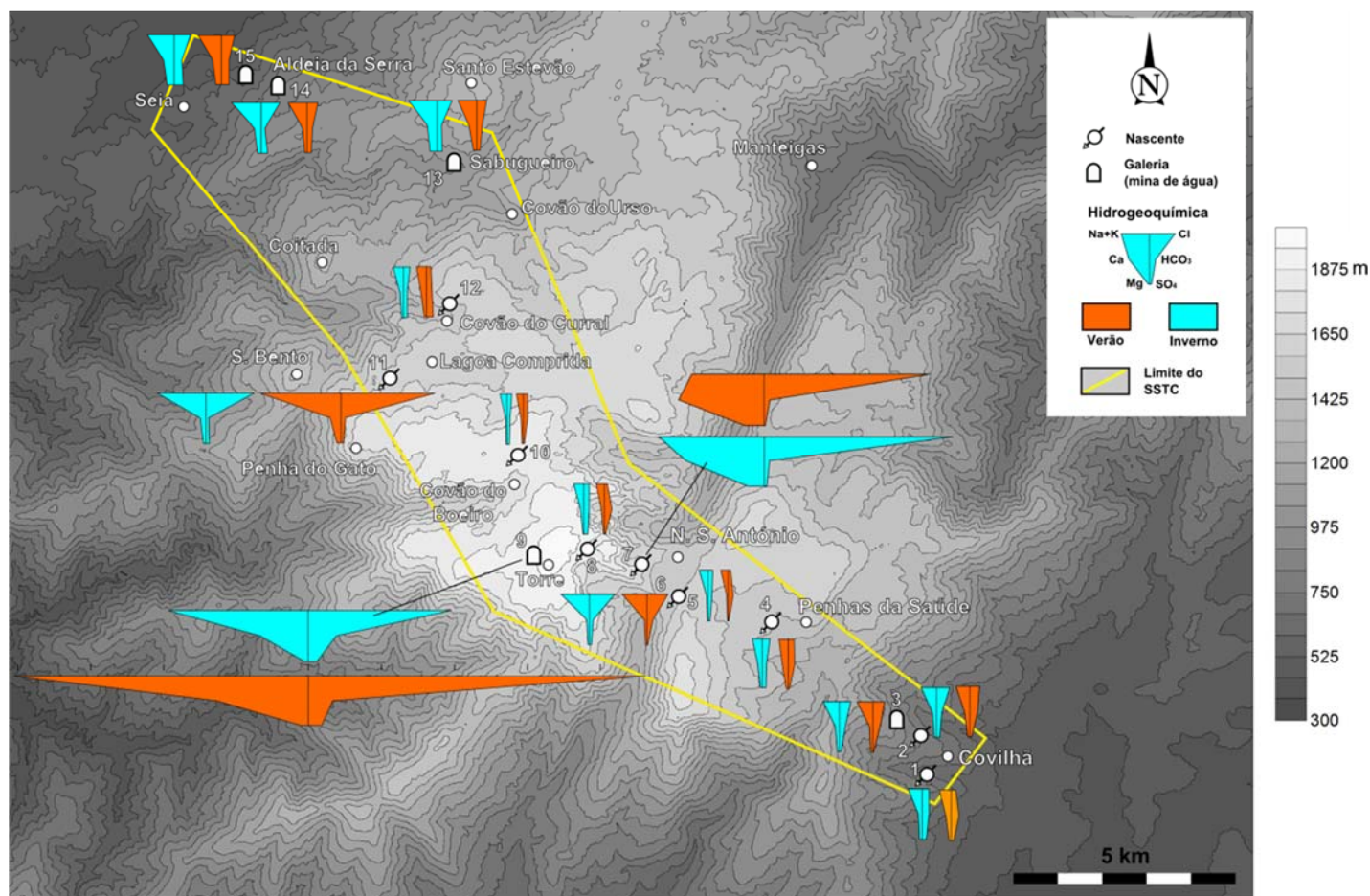


Fig. 5.13. Mapa hidrogeoquímico do setor Seia-Torre-Covilhã (1. Fonte Santa; 2. Fonte da Biquinha; 3. Mina da Rosa Negra; 4. Fonte das Penhas da Saúde; 5. Fonte da Saibreira; 6. Fonte da Nave Santo António Sul; 7. Fonte do Espinhaço de Cão; 8. Fonte do Covão do Boi; 9. Mina da Torre; 10. Fonte dos Perús; 11. Nascente da Lagoa Comprida; 12. Fonte do Covão do Curral; 13. Fonte do Ferreiro; 14. Fonte de S. Tomé; 15. Fonte do Marrão).

6. Hidrologia isotópica

6.1. Introdução

Há aproximadamente sete décadas que os isótopos naturais são utilizados em estudos hidrológicos, evidenciando forte incremento a partir dos anos 50 do séc. XX. A Hidrologia Isotópica tem sido fundamental para a compreensão da origem das águas (definição da altitude das áreas de recarga) e da sua movimentação (caraterização de linhas de fluxo), assim como para a identificação de mecanismos de interação entre águas subterrâneas e águas superficiais. Por outro lado, as técnicas nucleares de análise que recorrem a isótopos radioativos facultam uma estimativa da idade aparente dos sistemas subterrâneos, possibilitando assim, determinar, por exemplo, “o tempo de infiltração” e a duração do percurso subterrâneo, sendo, ainda, um instrumento bastante eficaz para a identificação de misturas entre águas subterrâneas de infiltração mais recente e mais antiga. O cálculo de idades permite também uma estimativa da determinação de velocidades de circulação aparentes da água subterrânea (Drever, 1997; Fitts, 2002; Hoefs, 2004; Faure & Messing, 2005; Gunter & Messing, 2005).

Importa referir que as técnicas isotópicas aplicadas à Hidrogeologia e Hidrologia recorrem, frequentemente, a espécies isotópicas ambientais e a espécies isotópicas artificiais.

A aplicabilidade dos isótopos ambientais à Hidrogeologia baseia-se no estudo das respectivas variações de concentração. Essas variações são determinadas por processos naturais, não controláveis pelo Homem. Os resultados são interpretados por comparação com padrões absolutos ou com variações isotópicas regionais. Dentro desse grupo as espécies isotópicas ambientais usualmente utilizadas em Hidrologia pertencem a duas classes distintas: a das espécies isotópicas ambientais estáveis e a das espécies isotópicas ambientais radioativas.

Em estudos de hidrogeoquímica isotópica, os isótopos ambientais habitualmente utilizados são o deutério (^2H), o carbono-13 (^{13}C) e o oxigénio-18 (^{18}O) (isótopos estáveis), enquanto que, das espécies isotópicas ambientais radioativas as mais utilizadas são o trítio (^3H) e o carbono-14 (^{14}C). A água é constituída por hidrogénio e oxigénio, podendo participar na sua constituição molecular os três isótopos estáveis de oxigénio (^{16}O , ^{17}O e ^{18}O) e os três isótopos de hidrogénio (^1H , ^2H e ^3H). Considerando esta variabilidade, existem diversas composições isotópicas possíveis de moléculas de água, cuja massa molecular varia entre 18 g/mol e 22 g/mol (IAEA, 1981).

Assim, considerando apenas os isótopos estáveis de O e de H, nove “arranjos isotópicos” são possíveis para a molécula de água, nomeadamente: H_2^{16}O , $\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$, $^2\text{H}_2^{16}\text{O}$, H_2^{17}O , $\text{H}^2\text{H}^{17}\text{O}$, $^2\text{H}_2^{17}\text{O}$, H_2^{18}O , $\text{H}^2\text{H}^{18}\text{O}$ e $^2\text{H}_2^{18}\text{O}$. Apesar de todas estas moléculas ocorrerem em águas naturais, apenas as moléculas H_2^{16}O , H_2^{18}O e $\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$, apresentam aplicabilidade em estudos hidrológicos, hidrogeológicos e geoquímicos (IAEA, 1981).

6.1.1. Isótopos estáveis e radioativos

Os isótopos de um elemento são átomos que possuem o mesmo número de prótons no seu núcleo, mas diferente número de massa. Esta diferença de massa deve-se à desigualdade de número de neutrões existentes no núcleo. Os isótopos de um determinado elemento podem ser estáveis ou radioativos, naturais ou artificiais (Drever, 1997; Anderson, 2003).

Drever (1997), distingue *isótopos estáveis* (os não envolvidos em processos de decaimento natural) de *isótopos radioativos* (os envolvidos nesses processos). Segundo o mesmo autor, o teor em isótopos radioativos nas amostras de águas subterrâneas pode ser utilizado na datação dos sistemas aquíferos, na identificação de processos de mistura entre sistemas de diferentes idades e na caracterização de linhas de fluxo. O teor em isótopos estáveis pode ser aplicado para se conhecer as origens da água, definição de áreas de recarga, a mistura de águas subterrâneas de diferentes origens, a origem da salinização dos sistemas aquíferos, bem como os processos que a afetam, por exemplo origem das massas de vapor de água e os mecanismos de evaporação.

No mesmo sentido, Kendall & McDonnell (1998), mencionam que os isótopos estáveis de oxigénio e hidrogénio são marcadores/traçadores ideais para se determinar a origem da água em circulação e para a caracterização dos sistemas aquíferos. A sua funcionalidade como marcadores/traçadores deve-se ao facto de estes componentes se comportarem conservadoramente, se não forem sujeitos a fatores modificadores exteriores ao próprio sistema (como por exemplo, processos de evaporação e mistura com águas de diferentes origens). Com efeito, as interações com materiais biológicos e geológicos ao longo do trajeto subterrâneo provocam efeitos insignificantes sobre as concentrações desses isótopos. Os mesmos autores

referem, ainda, que as concentrações e a variabilidade do teor isotópico de um soluto presente numa dada amostra de água poderão fornecer informações sobre as reações que são responsáveis pela sua presença (Gat, 1981) assim como acerca do sentido de fluxo sendo, por vezes, indicadores de poluição antrópica, como é exemplo o caso dos teores de ^{15}N .

6.1.2. Notação delta (δ)

Em Hidrologia Isotópica e em estudos de Geoquímica Isotópica a concentração dos isótopos estáveis, nomeadamente, de oxigénio e de hidrogénio em águas naturais, é, habitualmente, expressa em termos de notação delta (δ), através da seguinte expressão analítica:

$$\delta = \frac{(R_{amostra} - R_{padrão})}{R_{padrão}} \times 1000$$

em que $R_{amostra}$ representa a razão isotópica ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou $^2\text{H}/\text{H}$) da amostra e $R_{padrão}$ representa a mesma razão isotópica ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou $^2\text{H}/\text{H}$) do padrão. Os valores de delta (δ) são expressos em permilagem (‰) dos desvios em relação ao padrão (Gonfiantini, 1981). O padrão, relativamente ao qual se estabelecem os desvios dos valores calculados de delta, foi definido por Craig em 1961 tendo por base as determinações efetuadas pelo autor e pelos dados obtidos por Epstein & Mayeda (1953) e por Horibe & Kobayakawa (1960).

Inicialmente, o padrão adotado em estudos de Hidrologia Isotópica era o denominado por SMOW (*Standard Mean Ocean Water*), o qual pretendia representar a composição isotópica média das águas oceânicas, e estabelecia, por convenção, o zero da escala de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^2\text{H}$. Posteriormente, dado ter-se esgotado o SMOW, este

foi substituído pelo V-SMOW (*Vienna – Standard Mean Ocean Water*) criado nos laboratórios da IAEA (*International Atomic Energy Agency*) em Viena.

O Ciclo Hidrológico é habitualmente descrito como tendo início e fim nos oceanos. Assim o SMOW (ou o V-SMOW) pretende representar a composição isotópica de uma mistura que seja representativa da composição média dos oceanos (Gonfiantini, 1981). Sabendo que os oceanos apresentam uma composição isotópica aproximadamente uniforme, esta composição, expressa na notação delta, será próxima de zero tanto para $\delta^{18}\text{O}$ como para $\delta^2\text{H}$ (Gonfiantini, 1981). Assim, após uma primeira análise aos valores delta obtidos, pode-se verificar se uma amostra é enriquecida ou empobrecida relativamente ao padrão inicial conforme os valores sejam positivos ou negativos.

6.1.3. Fracionamento Isotópico

Segundo Gat (1981), o fracionamento isotópico é um qualquer processo que provoque uma variação entre as razões isotópicas da amostra (composição inicial – final) relativamente ao padrão. Mais concretamente, é o fenómeno que está na base da aplicabilidade de isótopos estáveis em estudos de Hidrologia Isotópica e de Geoquímica Isotópica, e consiste nas diferenças de comportamento dinâmico e cinético entre o isótopo mais leve e o isótopo mais pesado de um dado elemento, sendo proporcional à diferença entre as massas moleculares (Clark & Fritz, 1997; Kendall & McDonnell, 1998;).

O fracionamento isotópico da água pode ser originado por diversos processos naturais, tais como a atividade biológica (por exemplo a remoção preferencial de isótopos aquando da evapotranspiração e/ou transpiração nas folhas das plantas) e o

intercâmbio com outros materiais (trocas isotópicas entre a matriz do aquífero e a água a temperaturas elevadas em sistemas geotérmicos). Toda uma série de variabilidades observadas na natureza assentam no fato de a molécula H_2^{16}O ser mais volátil do que as moléculas isotopicamente mais pesadas. Esta diferença de massa e de ligações é a base do fracionamento isotópico e das variações isotópicas observadas em todos os processos que constituem o Ciclo Hidrológico: evaporação, condensação e precipitação (Dansgaard, 1964).

O fracionamento isotópico entre duas fases A e B de um dado sistema em equilíbrio, é traduzido pelo fator de fracionamento isotópico α , definido por Gat (1981), através da seguinte expressão seguinte:

$$\alpha = \frac{R_A}{R_B}$$

onde, R_A é a razão entre o isótopo mais pesado e o mais leve e mais abundante na fase A, e R_B é a mesma razão na fase B.

Devido ao fracionamento isotópico, os rácios $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e/ou $^2\text{H}/\text{H}$ assumem-se como impressões digitais de condições climáticas e hidrológicas, transformando as variações isotópicas em importantes marcadores naturais (Rozanski *et al.*, 1993; Geyh, 2000; Gat *et al.*, 2001).

Segundo Yurtserver & Gat (1981), Rozanski *et al.* (1993), Ingraham (1998), Aráguas-Aráguas *et al.* (2000) e Gat *et al.* (2001), as variações isotópicas observadas na precipitação (designados na literatura científica anglófona por “efeitos”) são devidos ao fracionamento isotópico provocado pelas mudanças de fases da água ao longo do Ciclo Hidrológico. A interpretação da distribuição global dos isótopos estáveis na atmosfera permitiu a Dansgaard (1964) identificar os chamados “efeitos” na variação isotópica da precipitação, em resultado da atuação de uma série de parâmetros físicos

e meteorológicos como, por exemplo: a latitude, a altitude, a distância relativa ao litoral, a quantidade de precipitação e temperatura média do ar.

“Efeito da Latitude”

A figura 6.1. representa os teores médios de ^{18}O determinados em amostras de água de precipitação em função da latitude do local de amostragem. À escala global, os “oceanos tropicais” (latitudes intermédias), representam a principal fonte de vapor de água atmosférico. O transporte e a dispersão de vapor de água estão relacionados com o início de fenómenos de precipitação originando gradualmente fracionamentos isotópicos que produzem uma evolução da composição isotópica das massas de vapor de água, tornando-se progressivamente mais empobrecidas em ^{18}O e $^2\text{H}\%$ (fig. 6.2.).

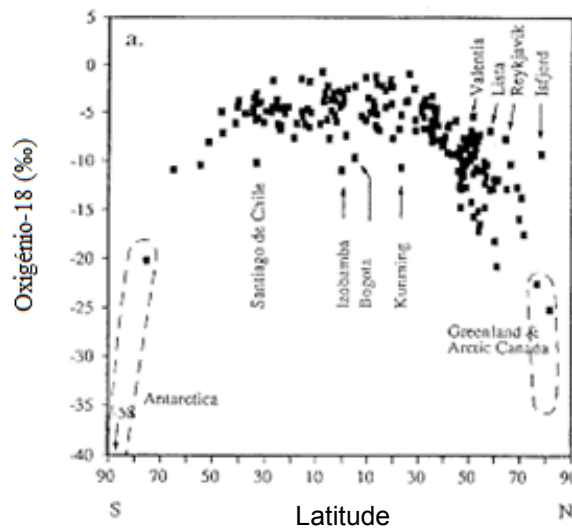


Fig. 6.1. Teores médios de ^{18}O na precipitação derivados da base de dados da IAEA/WMO em função da latitude (adaptado de Rozanski *et al.*, 1993).

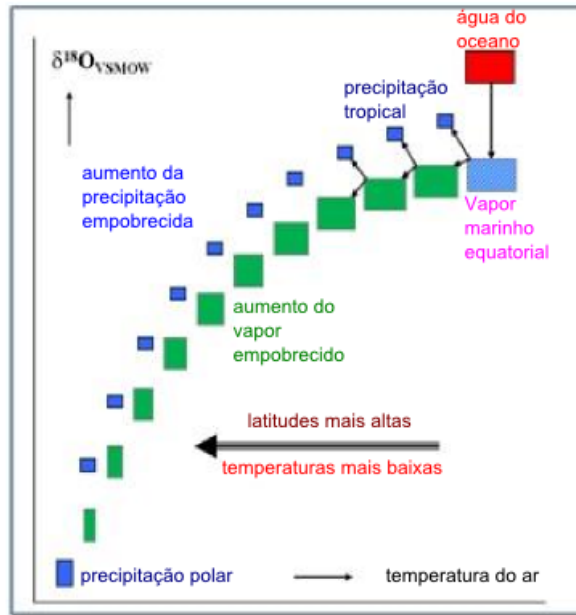


Fig. 6.2. Relação entre os teores de $\delta^{18}\text{O}$ na precipitação e a latitude da estação de amostragem (adaptado de Mook, 2000).

“Efeito de Altitude e de Continentalidade”

O fracionamento isotópico é também visível na forma como a distribuição espacial dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ é condicionada pela topografia continental. As cadeias montanhosas são geralmente caracterizadas por uma distribuição de teores isotópicos (^{18}O e ^2H) progressivamente mais empobrecidos com a altitude do local de amostragem. Por outro lado, observa-se igual tendência, isto é, um empobrecimento isotópico progressivo, à medida que as massas de vapor de água avançam para o interior dos continentes com sucessivos fracionamentos isotópicos, o chamada “efeito de continentalidade” (figs. 6.3. e 6.4.). Em síntese, o fracionamento observado nas águas de precipitação e nas massas de vapor de água atmosférico é devido à remoção gradual e preferencial dos isótopos mais pesados da mistura das massas de ar que se deslocam para o interior ou que ascendem. A quantificação do efeito de altitude tem sido utilizada na definição da altitude de recarga dos sistemas aquíferos.

De uma forma geral o efeito de altitude varia entre -4 a -1 ‰ / 100 m de altitude para ^2H e entre -0,6 a -0,1 ‰ / 100 m de altitude para ^{18}O .

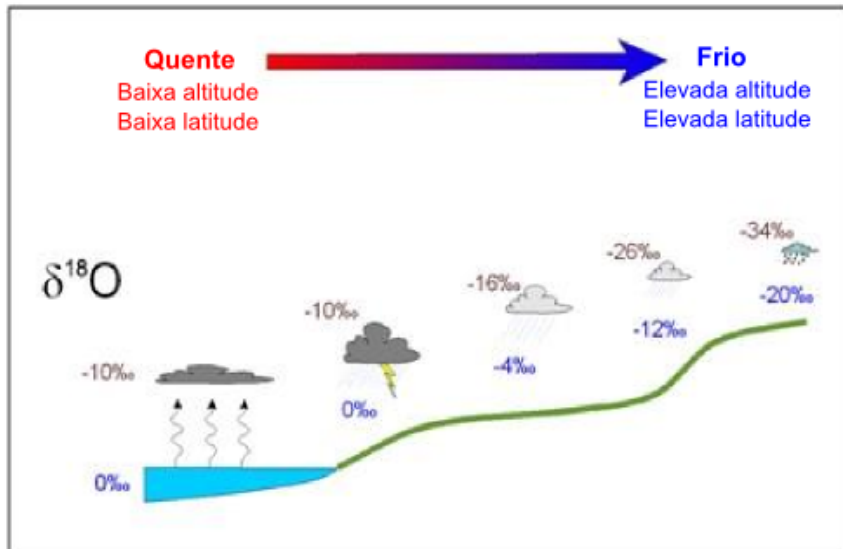


Fig. 6.3. Representação esquemática do “efeito de altitude e continentalidade” no fracionamento dos isótopos de oxigênio na atmosfera (adaptado de Mook, 2000).

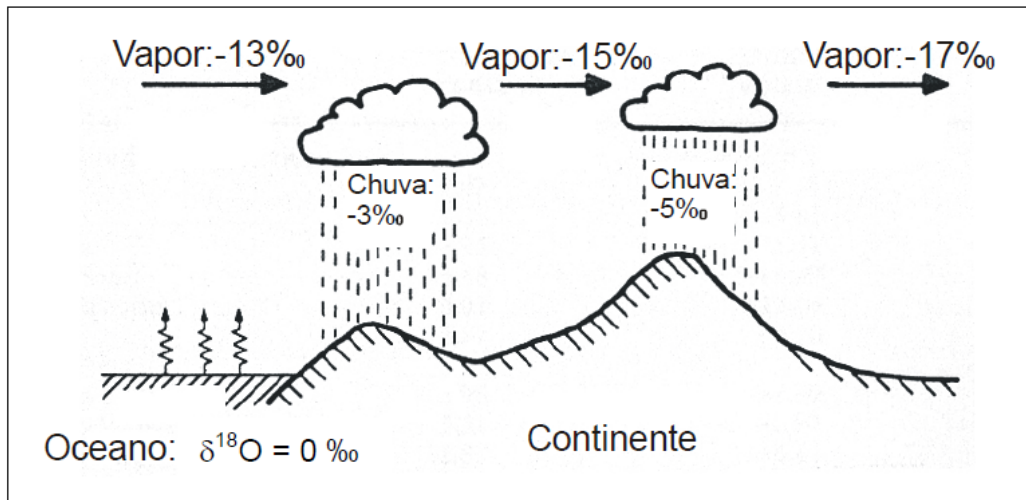


Fig. 6.4. Representação esquemática do fracionamento dos isótopos de oxigênio no vapor de água atmosférico e precipitação (adaptado de Hoefs, 2004).

“Efeito de Sazonalidade”

A análise sistemática mensal de amostras de água de precipitação pertencentes a diferentes estações meteorológicas distribuídas pelo globo e situadas em latitudes médias e elevadas, revela uma variação sazonal nos teores de ^2H e de ^{18}O , com teores mais empobrecidos no Inverno e mais enriquecidos no Verão. Este padrão de distribuição da composição isotópica da precipitação ao longo do ano deve-se à variação sazonal de temperatura ao longo dos meses do ano. O “efeito de sazonalidade” na composição isotópica é mais acentuada e visível nas regiões situadas a médias e altas latitudes uma vez que nessas regiões se registam maiores variações de temperatura ao longo do ano do que nos trópicos, dada a pequena amplitude térmica anual aí registada.

Por outro lado, importa referir que estudos de Hidrologia/Climatologia Isotópica realizados pela IAEA em cooperação com a WMO (*World Meteorological Organization*) em zonas tropicais, registaram flutuações sazonais nos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^2\text{H}$, relacionadas não com as variações de temperatura ambientais mas, principalmente, associadas com a quantidade de precipitação ocorrida.

Segundo Rozanski *et al.* (1993), as variações sazonais de $\delta^{18}\text{O}$ e de temperatura são muito mais evidentes em regiões continentais do que em regiões costeiras. De acordo com o autor, em regiões continentais, durante os meses mais quentes, verifica-se uma forte contribuição de lagos, rios, barragens que provocam uma variação isotópica nas massas de vapor de água atmosférico sobre os continentes.

“Efeito de quantidade”

A “aparente correlação” entre a quantidade mensal de precipitação e a sua composição isotópica foi referida por Dansgaard (1964). Recorrendo à base de dados do GNIP (*Global Network of Isotopes in Precipitation*) da IAEA, Rozanski *et. al.* (1993) referem a relação inversa entre a média mensal ou anual de $\delta^{18}\text{O}$ da precipitação e a quantidade de precipitação ocorrida. Yapp (1982), através de um modelo computacional mostrou que o “efeito de quantidade” pode ser explicado, em parte, como consequência de um longo e contínuo processo de fenómenos de precipitação de nuvens convectivas, devido a uma forte correspondência notada entre a intensidade média mensal e a quantidade de precipitação.

Outro processo que contribui para a variação da composição isotópica da precipitação e que se encontra parcialmente associada ao “efeito de quantidade” está relacionado com a troca isotópica e a evaporação parcial das gotas de chuva na base das nuvens. Dansgaard (1964) estabelece uma relação entre os meses com baixa precipitação e um provável enriquecimento isotópico originado pela evaporação das gotas de chuva que pode assumir importante papel na modificação da composição isotópica “inicial”. De acordo com estudos de Rozanski *et al.* (1993), para algumas estações continentais tropicais a aparente correlação entre a composição isotópica da precipitação e a quantidade é controlada não só por processos de precipitação longos como também por alterações na composição isotópica das massas de vapor na origem.

Influência da temperatura local

A aparente relação entre a temperatura média do ar e a composição isotópica da precipitação foi definida, inicialmente por Dansgaard (1964). Este estabeleceu uma

relação entre a temperatura média do ar e a composição isotópica das águas meteóricas, originadas entre -50°C e 0°C, em estações situadas em médias a altas latitudes, através das seguintes relações empíricas:

$$\delta^{18}\text{O}=0,69T_a-13,6\text{‰}$$

$$\delta^2\text{H}=5,6T_a-100\text{‰}$$

onde T_a representa a temperatura média anual do ar em °C. Posteriormente, foi definida uma nova relação entre a composição isotópica da precipitação e temperaturas médias do ar entre 5°C e 30°C, por Yurtsever & Gat (1981), que estimaram valores de 0,29‰/°C e 0,31‰/°C, para o $\delta^{18}\text{O}$, para regiões continentais e costeiras, respetivamente. Estudos mais recentes indicam valores médios de 0,31‰/°C, para o $\delta^{18}\text{O}$ (Rozanski *et al.*, 1993).

No geral, podem ser definidos três tipos de relação entre isótopos e temperatura do ar: uma relação espacial entre a variação da composição isotópica da precipitação e a temperatura da superfície frontal da massa de ar; uma relação temporal entre mudanças sazonais da composição isotópica e a temperatura; e uma segunda relação temporal entre a composição isotópica e a temperatura do ar de determinado local (Rozanski *et al.*, 1993).

A relação observada entre a composição isotópica da precipitação ($\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$) e a temperatura média do ar em determinado local é, como se referiu anteriormente, de grande importância no que diz respeito à aplicação de isótopos estáveis em estudos de paleohidrologia e de paleoclimatologia (Rozanski *et al.*, 1993).

Lawrence & White (1991) examinaram, detalhadamente, os dados disponíveis relativos à meteorologia e composição isotópica da precipitação de várias estações da rede de estações da IAEA/WMO tendo concluído que a correlação entre os parâmetros meteorológicos – temperatura do ar e quantidade de precipitação – e a composição isotópica da precipitação, derivam da variação interanual desses

parâmetros, de acordo com as estações do ano. De acordo com estudos realizados por Rozanski *et al.* (1993) e, mais recentemente, por Gourecy *et al.* (2005), para estações continentais, a correlação obtida entre teores de ^{18}O e a quantidade de precipitação, é pouco significativa. A temperatura aparenta ser o parâmetro que controla maioritariamente a composição isotópica da precipitação em ambiente continental. Por outro lado, estações em clima tropical, tendem a apresentar correlações significativas entre os teores de ^{18}O e a quantidade de precipitação, sem aparente ligação entre as flutuações de temperatura nessas estações, que são mínimas ao longo do ano.

Relação $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$

A relação ^{18}O - ^2H observada nas águas doces foi inicialmente referida por Friedman em 1953. Em 1961, Craig comparou os valores de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e $^2\text{H}/\text{H}$, com os rácios de valores referentes a amostragens de águas meteóricas continentais distribuídas pelo globo, com rácios definidos para o padrão V-SMOW, definindo, assim, a denominada reta das águas meteóricas (MWL - *Meteoric Water Line*), que relaciona os valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$, de acordo com a expressão analítica:

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$$

$$\text{em que } \delta^2\text{H}(\text{‰}) = \left[\frac{(^2\text{H}/\text{H})_{\text{amostra}}}{(^2\text{H}/\text{H})_{\text{SMOW}}} - 1 \right] \times 10^3 \text{ e } \delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = \left[\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{amostra}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} - 1 \right] \times 10^3$$

A MWL, posteriormente designada na literatura anglófona por *Global Meteoric Water Line* (G-MWL), é uma referência para a compreensão da origem e na caracterização das águas subterrâneas.

A relação global $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ foi estudada através da reprodução do modelo das massas de ar isoladas, de acordo com a aproximação ao modelo de fracionamento

isotópico de Rayleigh (Merlivat & Jouzel, 1979) e segundo um modelo geral de circulação das massas de ar atmosférico (Joussaume *et al.*, 1984; Jouzel *et al.*, 1987). Através do modelo geral de circulação das massas de ar atmosférico, foi possível demonstrar que o valor da ordenada na origem, ponto de interceção da reta das águas meteóricas mundiais, “é controlado” fundamentalmente pela origem das massas de vapor de água que, na maioria das vezes, corresponde à região subtropical. A temperatura da superfície do mar, a humidade do ar e a velocidade do vento são os principais parâmetros de controlo desse processo. Importa ainda referir que o declive da reta das águas meteóricas mundiais (GMWL) é controlado, em primeiro lugar, pela razão de equilíbrio do fator de fracionamento (Dansgaard, 1964; Merlivat & Jouzel, 1979).

6.1.4 Origem meteórica da água subterrânea e variações na composição isotópica

A evaporação é o processo físico em que as moléculas de água passam do estado líquido para o estado gasoso, formando as massas de vapor de água atmosférico. As moléculas de água mais leves evaporam mais facilmente que as pesadas (devido às forças de ligação mais fracas). Como resultado, ocorre fracionamento isotópico parcial na evaporação da água: o vapor resultante é mais rico em moléculas leves, refletindo valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mais empobrecidos (figs. 6.4. e 6.5.). Por outro lado, a água residual torna-se relativamente mais enriquecida em isótopos pesados, traduzindo-se em valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mais enriquecidos.

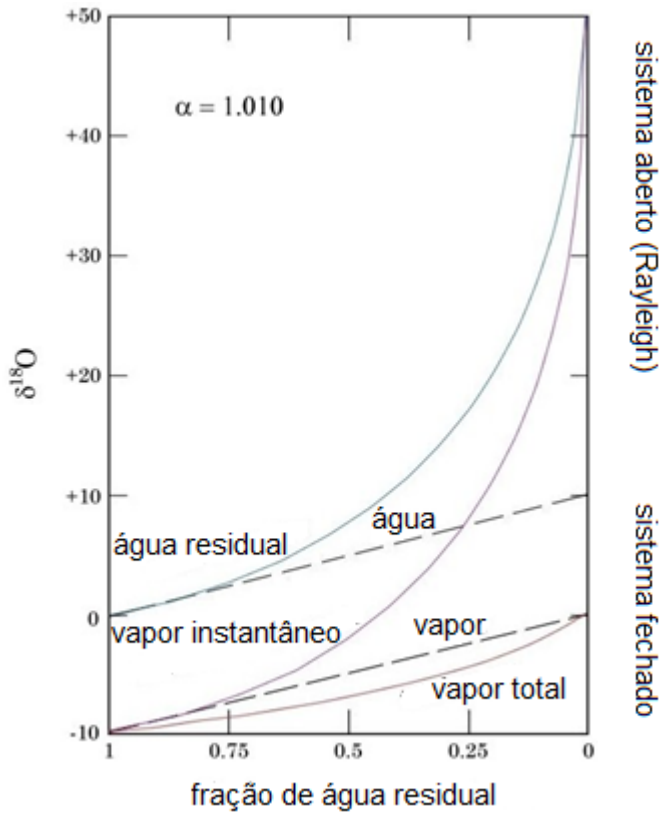


Fig. 6.5. Fracionamento isotópico da água e do vapor remanescente em processos de evaporação (adaptado de IAEA, 1981).

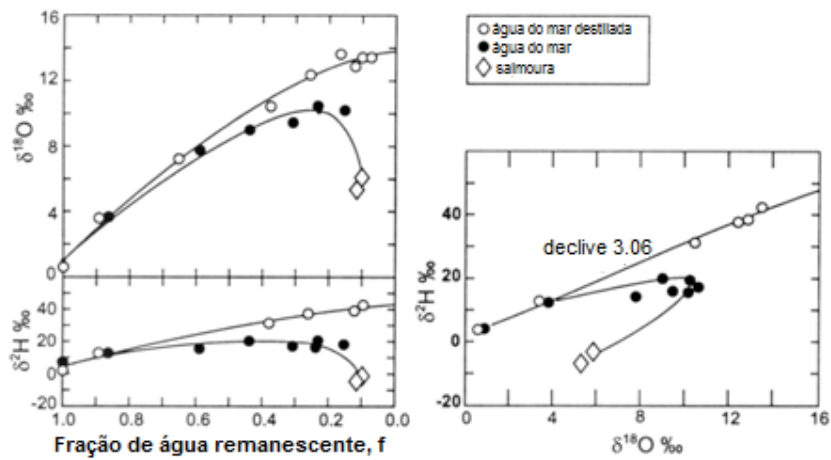


Fig. 6.6. Fracionamento isotópico na água residual (adaptado de University of Ottawa, 2013).

Por vezes o processo de enriquecimento isotópico parece sofrer uma quebra, podendo, mesmo, observar-se um retrocesso dos teores em ^{18}O e em ^2H (fig. 6.6.). Contudo, na natureza, habitualmente, a evaporação é apenas parcial no intervalo em que o enriquecimento da água residual ocorre (Mazor, 2004). No seguimento do que foi supra referido, os processos de evaporação das águas do mar por exemplo, originam as massas de água que sofrem fracionamentos isotópicos aquando da formação de nuvens (massas de vapor atmosférico). Essas massas apresentam uma composição isotópica mais leve (empobrecida) do que a água dos oceanos que lhe deram origem.

Relativamente aos processos de condensação, durante a formação da precipitação, ocorre o inverso, ou seja, as moléculas de águas mais pesadas condensam mais facilmente, ficando o vapor de água atmosférico residual empobrecido em ^2H e em ^{18}O (Mazor, 2004). A primeira pequena quantidade de água condensada do vapor em equilíbrio com SMOW terá uma composição isotópica muito semelhante à do SMOW. Por condensações sucessivas, a massa de vapor de água irá modificar sucessivamente a sua composição isotópica, onde as espécies isotópicas pesadas (^2H e ^{18}O) serão removidas preferencialmente da massa de vapor remanescente e, conseqüentemente, a formação da condensação mais recente, será assim cada vez mais empobrecida. Durante a precipitação, desde a nuvem até ao solo, as gotas de água estão sujeitas à evaporação e a mudanças de composição isotópica do vapor de água atmosférico (fig. 6.3). Esses processos são importantes para a composição final da água que chega ao solo (Dansgaard, 1964).

A condensação isotérmica nunca acontece na natureza. Nos processos naturais, a formação de precipitação é causada pelo arrefecimento das massas de vapor de água. Contudo, dado o número de fatores que influenciam a composição isotópica da precipitação não é cientificamente correto utilizar a composição isotópica

de uma dada quantidade de precipitação como indicador de temperatura de condensação, uma vez que composição observada/obtida numa determinada amostra de água da chuva é função de vários parâmetros, tais como, por exemplo: das condições termodinâmicas durante o arrefecimento, a composição inicial da massa de água, etc. (Dansgaard, 1964).

No Ciclo Hidrológico, os fenómenos de fracionamento isotópico são responsáveis pelas variações de composição isotópica da precipitação relativamente à composição dos oceanos. Estas modificações devem-se ao facto de que à medida que a água dos oceanos se evapora, para formar o vapor atmosférico, este é essencialmente constituído por ^{16}O e H devido às forças de ligação da molécula da água serem mais fracas, logo mais fáceis de quebrar, para estes isótopos mais leves, durante um processo de evaporação. Por este motivo, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ do vapor de água atmosférico são negativos, de onde resulta que a precipitação seja habitualmente empobrecida em ^{18}O e ^2H quando comparada com o padrão internacional (fig.6.7). Como consequência dos sucessivos fenómenos de evaporação, condensação e posterior precipitação das massas de vapor atmosférico, observam-se variações que se traduzem numa evolução da composição isotópica dessas massas de vapor de água atmosférico de onde resulta precipitação com valores δ mais empobrecidos (fig. 6.3).

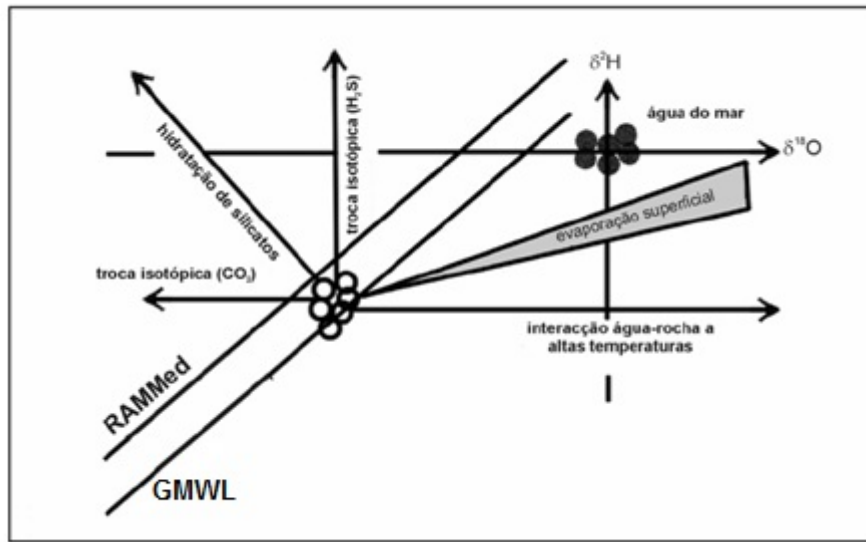


Fig. 6.7. Representação esquemática dos principais processos responsáveis pela variação nos valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ relativamente à reta das águas meteóricas mundiais; (GMWL: *Global Meteoric Water Line*; RAMMed: reta das águas meteóricas mediterrânicas) (adaptado de Geyh, 2000).

6.1.5. Aplicação do ^3H em estudos de Hidrologia Isotópica

O trítio (^3H), é o isótopo natural radioativo do hidrogénio. É o isótopo de hidrogénio mais pesado e os seus átomos são instáveis, desintegram-se e formando átomos estáveis de ^3He .

A radioatividade é a transformação de certos isótopos dos elementos químicos noutras espécies, como consequência da desintegração dos seus núcleos. O decaimento radioativo é um processo espontâneo, de natureza aleatória, não alterável por influências externas, que obedece à lei:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

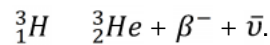
sendo, N_0 e N o número de átomos da espécie radioativa nos instantes $t=0$ e t , respetivamente, e λ a constante de desintegração. A taxa de decaimento radioativo, ou

período de desintegração, é habitualmente expressa em semi-vida desse isótopo, $T_{1/2}$, o qual define o tempo necessário para que determinado número de átomos de uma espécie se reduza a metade. A constante de desintegração (λ) e o período ($T_{1/2}$), relacionam-se através da seguinte expressão:

$$T_{1/2} = \ln \frac{2}{\lambda}$$

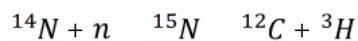
e assumem valores característicos para cada tipo de isótopo.

O trítio apresenta um tempo de semi-vida de 12,32 anos (Lucas & Unterweger, 2000). A desintegração do núcleo do trítio emite uma partícula $\beta(^{-1}_0e)$ sendo acompanhada pela emissão de um antineutrino $\bar{\nu}$:



As concentrações de trítio em águas naturais e em estudos hidrológicos são geralmente expressas em Unidade de Trítio, TU - 'Tritium Unit'. Uma Unidade de Trítio corresponde a $1TU = ^3H/^1H = 10^{-8}$, o que equivale a 7,2 dpm (desintegrações por minuto) por litro de água, ou seja 0,12 Bq/L (Becquerel/L) (Payne, 1983).

O trítio, faz parte da molécula de água, podendo ter uma origem natural ou artificial. A origem natural do 3H está relacionada com sua produção nas altas camadas da atmosfera, como resultado da interação entre neutrões (n), produzidos por raios cósmicos na estratosfera, e os núcleos dos átomos de azoto, expressa da seguinte forma:



Os átomos de trítio produzidos na atmosfera são rapidamente oxidados passando a $^1H^3HO$ (vapor de água atmosférico), que passam a integrar as massas de vapor, que irão originar a precipitação, passando a fazer parte das águas subterrâneas

e dos sistemas hídricos superficiais. Estima-se que a produção de trítio natural seja na ordem dos 200 g/ano (Gonfiantini *et al.*, 1990; Rozanski *et al.*, 1991).

A origem artificial do ^3H está associada a processos relacionados com a atividade nuclear desenvolvida pelo Homem. Destes vários processos destacam-se (Rozanski *et al.*, 1991):

- i. ensaios termonucleares na atmosfera ocorridos, sobretudo no hemisfério norte, entre 1952 e 1963, em consequência dos quais foram libertadas grandes quantidades de trítio, atingindo um total de cerca de 600 Kg. Estes testes provocaram o aumento da concentração deste isótopo nas massas de vapor de água atmosférica e, conseqüentemente, teores mais elevados na precipitação, atingindo concentrações máximas perto dos 10000 TU (fig. 6.8).
- ii. emissões pontuais de ^3H para a atmosfera, resultado das atividades da indústria nuclear, como por exemplo: os efluentes gasosos e líquidos resultantes do arrefecimento dos reatores nucleares;
- iii. utilização de produtos industriais luminosos como por exemplo algumas tintas, lâmpadas e relógios.

Desde 1963, ano em que a concentração de trítio na atmosfera atingiu teores máximos como consequência dos ensaios termonucleares realizados, as concentrações em ^3H têm diminuído gradualmente. Mook (2000) refere ainda, que em várias zonas do globo, as concentrações de trítio nas águas subterrâneas apresentam teores superiores aos relacionados apenas com uma produção natural de ^3H .

Tanto o trítio de origem natural como o de origem artificial é rapidamente oxidado, passando a vapor de água atmosférico ($^1\text{H}^3\text{HO}$), e entrando no Ciclo Hidrológico sob a forma de precipitação e através de trocas isotópicas entre o ar e as massas de água oceânicas (fig. 6.9).

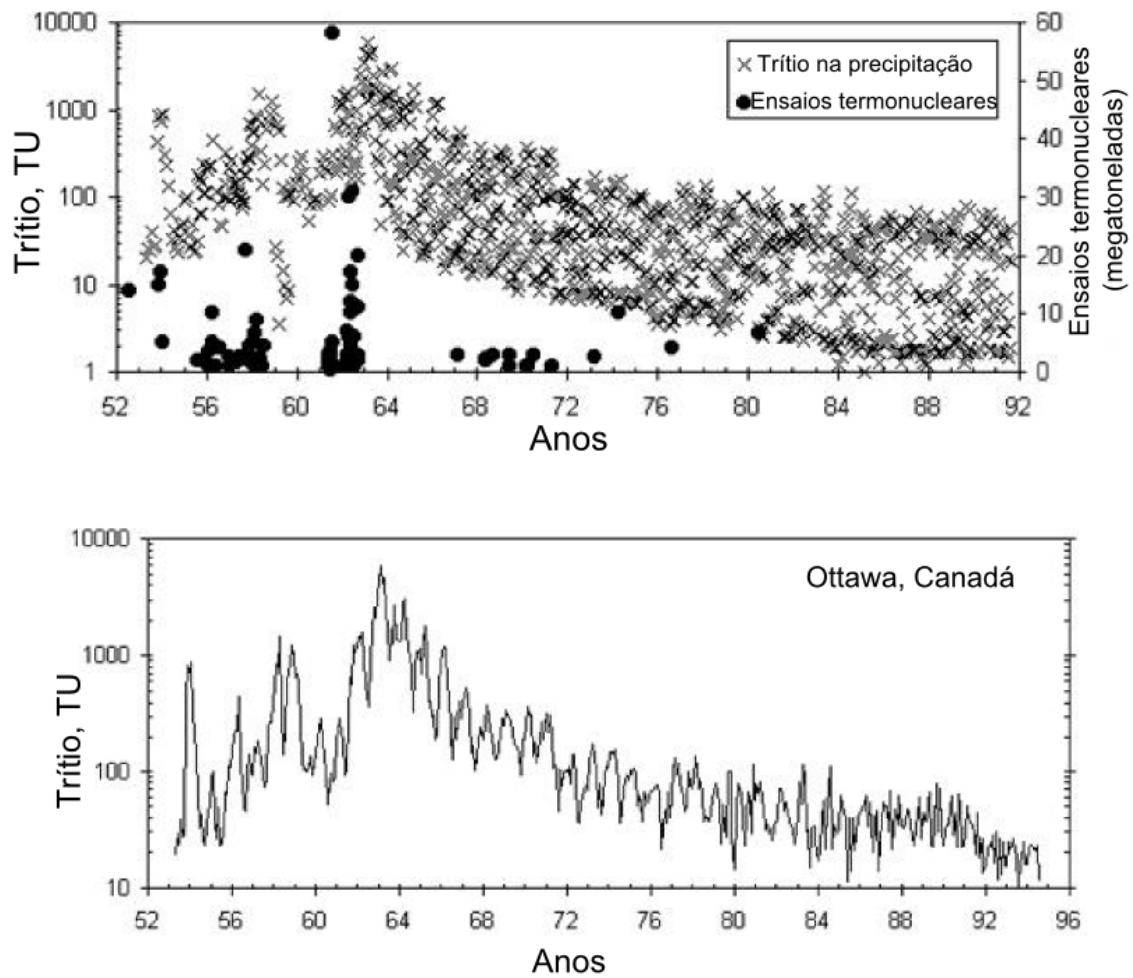


Fig. 6.8. Concentração de trítio na precipitação no período de ensaios termonucleares no séc. XX (adaptado de University of Ottawa, 2013).

O teor em ^3H varia ao longo do Ciclo Hidrológico, tanto no espaço como no tempo, devido ao fracionamento isotópico. A variação dos teores de trítio nas águas de precipitação são diretamente influenciadas por fatores como a distancia ao litoral, latitude, época do ano, entre outras, e por fatores antrópicos de influência local e/ou regional (figs. 6.10 e 6.11) (Rozanski *et al.*, 1991).

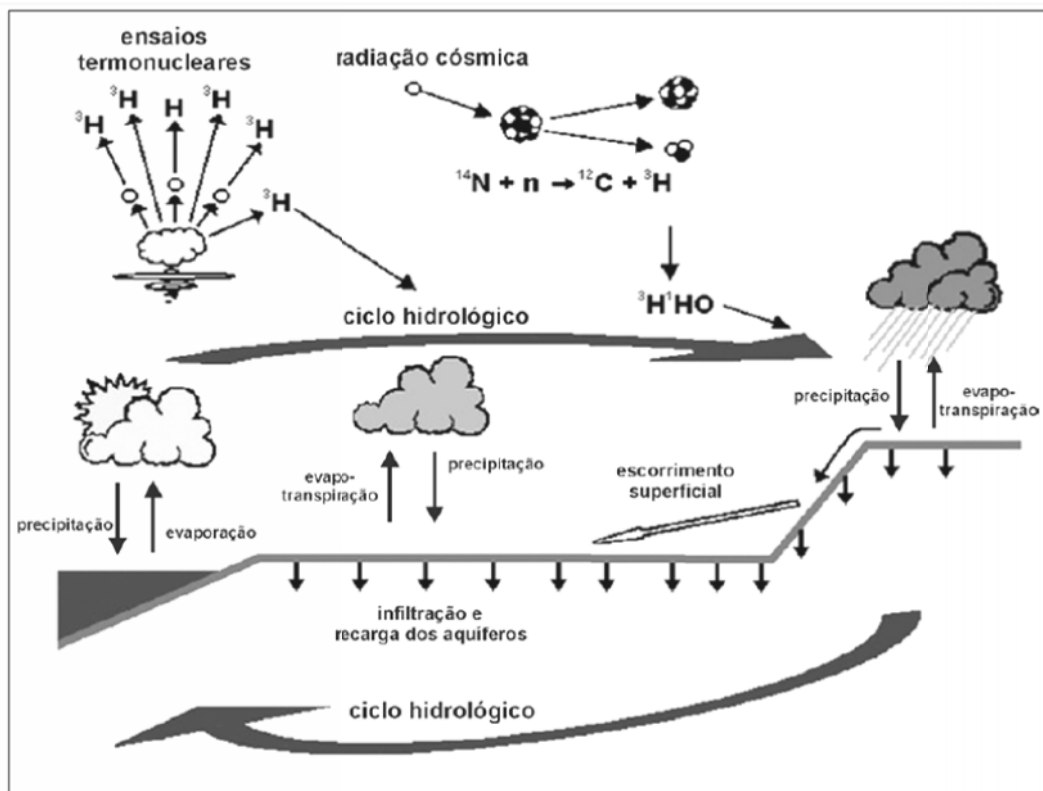


Fig. 6.9. Representação esquemática da origem (natural e antrópica) e entrada de trítio no Ciclo Hidrológico (adaptado de Mook, 2000).

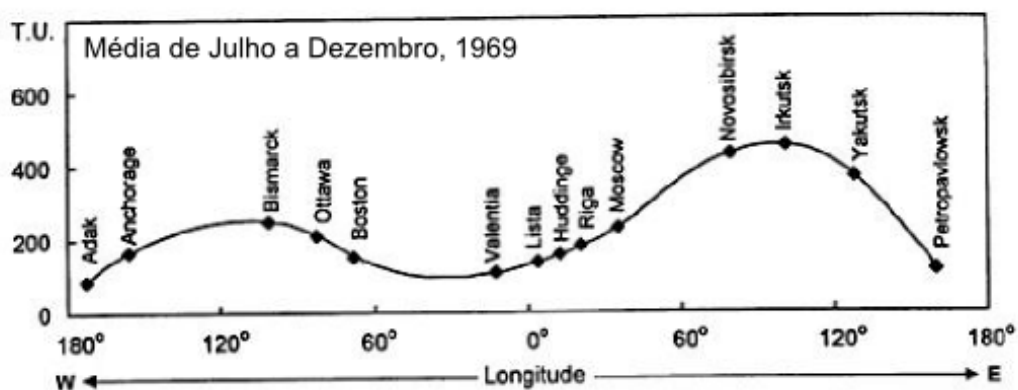


Fig. 6.10. Efeito de Continentalidade sobre a variação dos teores em trítio de águas de precipitação, em estações meteorológicas localizadas a diferentes longitude (adaptado de Ferronsky & Polyakov, 1982).

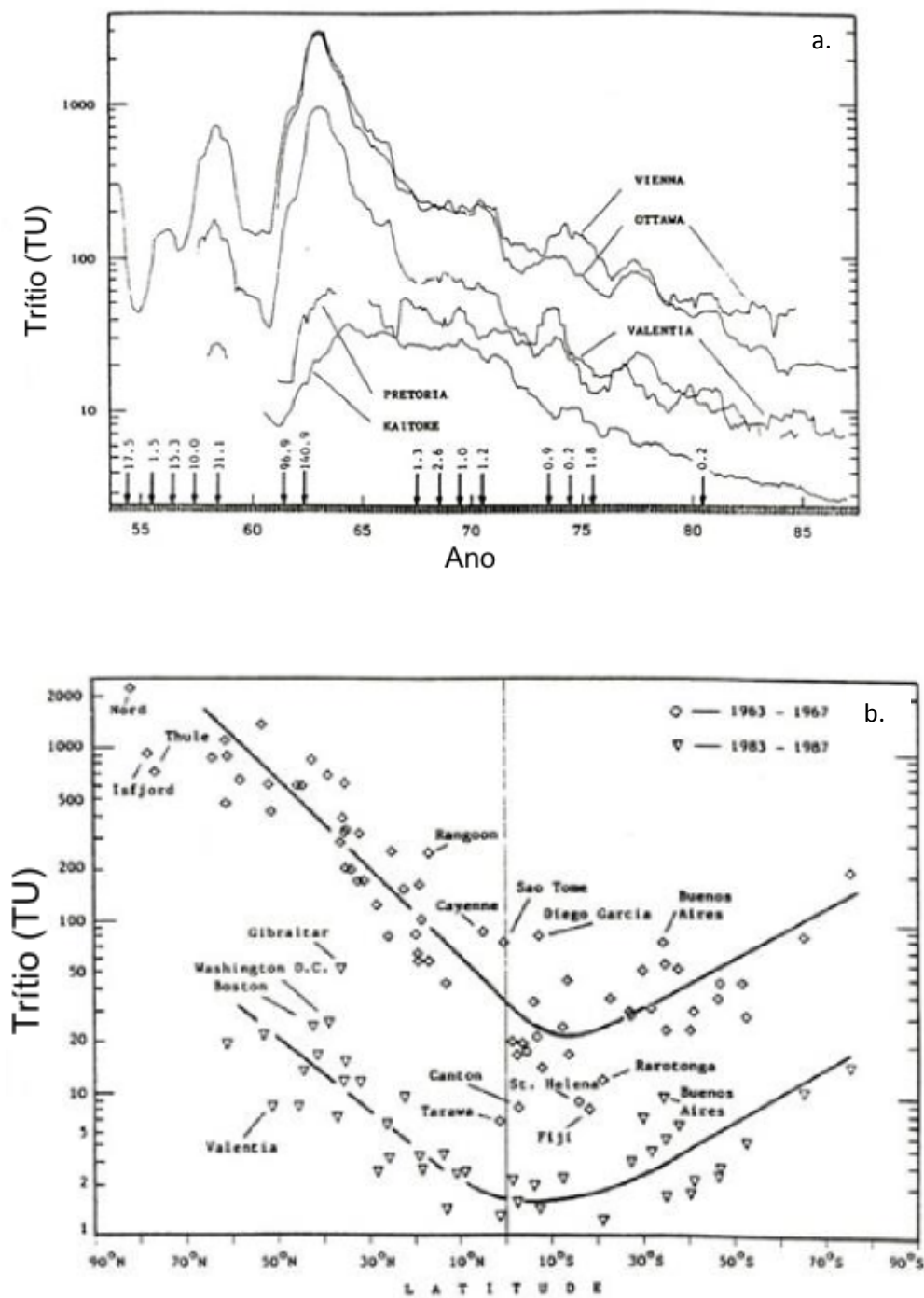


Fig. 6.11. a. Tendências a longo prazo para a concentração em trítio na precipitação em diversas estações da rede da IAEA/WMO. b. Distribuição dos teores de trítio na precipitação mensal em função da latitude para estações da rede de IAEA/WMO (adaptado de Gonfiantini *et al.*, 1990).

Em estudos hidrogeológicos, considera-se que o teor em trítio pode fornecer informações de carácter qualitativo no que respeita a:

- (i) à duração dos percursos subterrâneos;
- (ii) à existência de misturas entre águas de infiltração recente e águas subterrâneas mais antigas, (uma vez que a presença de valores de ^3H relativamente elevados nas águas subterrâneas é um bom indicador da contribuição de águas de infiltração recente);
- (iii) à “idade” das águas subterrâneas. Contudo, a determinação da idade absoluta das águas subterrâneas torna-se complicada devido à variabilidade da ‘função de entrada’ - *input value* - (teor em ^3H atmosférico quando ocorreu a precipitação e/ou quando esta se infiltrou) (fig. 6.12.). Deste modo, não é possível fazer o calculo direto (a partir das leis de decaimento radioativo) da idade de uma água subterrânea, havendo necessidade de recorrer a diferentes modelos matemáticos (Clark & Fritz, 1997).

Os teores de ^3H obtidos podem ser interpretados de uma forma qualitativa ou recorrendo a modelos matemáticos (fig. 6.12), de forma a conseguir-se uma interpretação quantitativa das concentrações presentes.

A aproximação qualitativa na datação de um sistema aquífero é realizada com base nos teores em ^3H e no estudo do comportamento, espacial e temporal, desse isótopo no sistema hidrogeológico.

A ausência de trítio pode ser indicativa da inexistência de recargas posteriores a 1963 (pico de concentração de ^3H na atmosfera do hemisfério N). Por vezes, observa-se no sistema uma ausência desse isótopo de hidrogénio a partir de uma determinada profundidade. Esta situação particular está muitas vezes relacionada com a

estratificação dos diferentes episódios de recarga associados a uma circulação lenta, ou por acontecimentos de recarga quase inexistentes, situação frequentemente observada em regiões áridas e semi-áridas (Clark & Fritz, 1997).

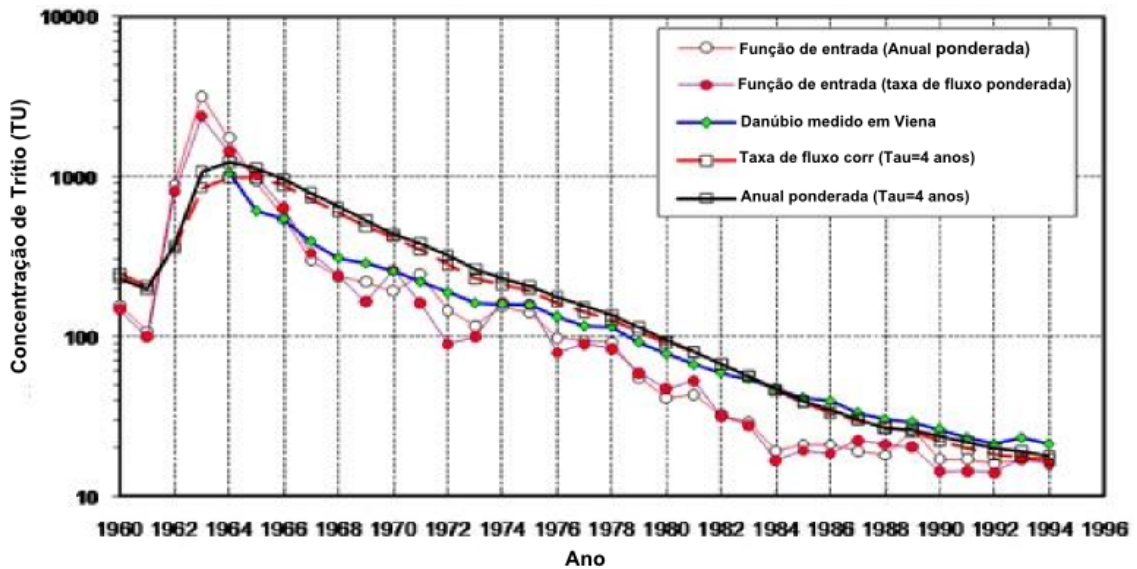


Fig. 6.12. Variação da concentração em trítio recorrendo a diferentes modelos matemáticos, admitindo como variáveis o teor inicial de trítio e o tempo de circulação subterrânea (cedido por Luis Aráguas, AIEA, 2010).

Por outro lado, no caso de sistemas aquíferos que apresentam teores de ^3H elevados, com variações temporais no mesmo ponto de amostragem, essa variabilidade poderá estar associada à presença de águas de infiltração recentes. A variabilidade dos teores de ^3H pode dever-se a diferentes fatores, tais como:

- a ocorrência de variações de concentração na precipitação da área de recarga ao longo do ano hidrológico (efeito da sazonalidade);
- a variação da velocidade de circulação vertical da água na zona não saturada, até atingir o aquífero;
- a mistura de águas de aquíferos diferentes.

Contudo, a simples ocorrência de variação do teor de ^3H é indicadora de um tempo de circulação relativamente recente, uma vez que, um tempo de residência maior levaria à homogeneização das diferentes recargas no interior do sistema aquífero. É de realçar que a presença de trítio num sistema aquífero é, na maioria das vezes, indicador da presença de água moderna no sistema, recarga ativa do sistema. Todavia, importa não esquecer que, por vezes o decaimento de minerais de urânio produz *in situ*, trítio que poderá entrar para o sistema aquoso (Moser *et al.*, 1989).

A determinação do teor de ^3H permite uma datação semi-qualitativa dos sistemas subterrâneos:

- águas com zero unidades de trítio, na prática teores menores que 0,5 TU, podem datar-se como de infiltração anterior a 1952;
- concentrações em ^3H significativas, ou seja, superiores a 10 TU, permite datar o sistema como de infiltração posterior a 1952 e contemporânea dos testes termonucleares realizados na atmosfera;
- teores relativamente baixos, entre 0,5 a 10 TU, podem representar uma mistura de águas infiltradas antes e após 1952, ou águas muito recentes (2-3 anos) se as concentrações se situarem entre 5 e 10 TU (Mazor, 2004).

Como supramencionado, a determinação da idade absoluta de uma água subterrânea através do seu teor de trítio não deverá ser aplicada diretamente devido à variabilidade da ‘função de entrada’. Para tal, são utilizados modelos matemáticos, que se dividem em dois grandes grupos, o ‘modelo de pistão’ e o ‘modelo de mistura simples’ (Fontes, 1983 *in*: Carreira *et al.*, 2003). Estes modelos relacionam os teores em ^3H determinados nas amostras de água, com os valores em ^3H determinados na precipitação regional ao longo de vários anos em amostragens sistemáticas:

- O **modelo de fluxo de pistão** admite que cada episódio de recarga fica estratificado sobre os anteriores: todo o sistema hidrológico se move à semelhança de células independentes e isoladas, sem existir qualquer tipo de mistura entre os vários episódios de recarga. O último força ao deslocamento de todos os anteriores. Estima-se um tempo médio de residência para a água subterrânea idêntico para todos os episódios de recarga. Este valor médio é calculado através da relação entre o decaimento dos átomos de ^3H e as concentrações na amostra e na atmosfera (série de anos).
- O **modelo exponencial ou modelo de mistura simples**, de acordo com o qual cada episódio de recarga possui uma determinada concentração em ^3H , que se mistura instantânea e completamente com a água existente no sistema. O aquífero possui uma composição homogênea e, ao receber água de infiltração recente, inicia um novo processo de homogeneização. A concentração em ^3H determinada na amostra de água representa o teor médio existente no reservatório. Quando a concentração em ^3H na atmosfera (componente de recarga moderna) e a da amostra (descarga) apresentam uma amplitude de teores relativamente elevada no tempo, a datação do sistema subterrâneo, através da aplicação deste modelo, poderá induzir desvios de uma distribuição exponencial.

6.2. Hidrologia isotópica do sector de Seia-Torre-Covilhã

A aplicação de técnicas isotópicas tem sido essencial em estudos de Hidrologia e Hidrogeologia, por exemplo, quando é necessário obter resultados que ajudem a validar os modelos conceptuais dos sistemas, em particular, no estudo da origem e movimentação da água subterrânea, na estimativa da respetiva idade aparente, na estimativa do tempo de residência e de circulação e na potencial ocorrência de misturas com outras águas.

No caso do sector de Seia-Torre-Covilhã (SSTC) foram determinados os teores dos isótopos ^{18}O , ^2H e ^3H . As campanhas de amostragem de águas subterrâneas pertencentes a sistemas pouco profundos e de fraca mineralização, abrangeram 15 pontos de água e decorreram nos meses de Maio, Setembro e Dezembro de 2010 e nos meses de Abril, Junho e Setembro de 2011.

Conforme se pode verificar pela análise do Quadro 6.1. a composição isotópica em $\delta^{18}\text{O}$ das águas do sector de Seia-Torre-Covilhã varia entre -8,2‰ determinado no mês de Setembro de 2010 na Fonte do Covão do Boi, e -5,8‰, registado no mês de Dezembro de 2010, na Fonte Santa, enquanto que a composição isotópica em $\delta^2\text{H}$, varia entre -55‰ em Maio de 2010, na Fonte dos Perús e -38‰ em Maio de 2010, na Fonte do Marrão.

Com base no registo sistemático da composição isotópica dos pontos amostrados, calculou-se a reta das águas meteóricas locais (fig. 6.13.) do setor de Seia-Torre-Covilhã (LMWL – *Local Meteoric Water Line (Reta das Águas Meteóricas Locais)*) cuja equação é:

$$\delta^2\text{H}=7,44\delta^{18}\text{O}+7,44.$$

Quadro 6.1. Resultados das análises isotópicas de deutério e oxigénio-18 das águas do sector de Seia-Torre-Covilhã.

Ponto	Designação	Altitude (m)	Maio-10		Set-10		Dez-10		Abr-11		Jun-11		Set-11	
			$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
1	Fonte Santa	670	-6,4	-40	-6,7	-40	-5,8	-38	-6,5	-40	-6,7	-40	-6,3	-40
2	Fonte da Biquinha	810	-6,7	-41	-6,9	-42	-6,4	-40	-6,8	-41	-7,0	-41	-6,7	-42
3	Mina da Rosa Negra	950	-6,9	-42	-6,7	-41	-6,7	-43	-6,7	-41	-6,9	-41	-6,9	-42
4	Fonte das Penhas da Saúde	1480	-7,7	-52	-7,4	-48	-7,1	-46	-7,5	-48	-7,6	-47	-7,5	-48
5	Fonte da Saibreira	1555	-7,8	-51	-6,9	-46	-7,4	-48	-7,6	-48	-7,5	-48	-7,7	-48
6	Fonte da Nave de Santo António Sul	1585	-7,7	-51	-8,0	-48	-7,2	-47	-7,7	-48	-7,5	-49	-7,3	-48
7	Fonte de Espinhaço de Cão	1625	-7,1	-43	-8,1	-50	-7,2	-49	-7,5	-49	-7,4	-48	-7,6	-49
8	Fonte do Covão do Boi	1850	-7,6	-52	-8,2	-51	-7,2	-50	-7,6	-50	-7,5	-50	-7,8	-50
9	Mina da Torre	1990	-7,2	-48	-8,1	-50	-7,2	-48	-7,9	-52	-7,8	-49	-7,5	-49
10	Fonte dos Perús	1840	-8,0	-55	-7,5	-48	-7,0	-49	-7,7	-51	-8,0	-50	-7,7	-51
11	Nascente da Lagoa Comprida	1595	-7,3	-50	-6,9	-47	-7,4	-46	-7,7	-48	-7,5	-47	-7,2	-47
12	Fonte do Covão do Curral	1500	-7,4	-47	-6,7	-45	-7,2	-46	-7,5	-46	-7,3	-46	-7,3	-47
13	Fonte do Ferreiro	1050	-6,6	-39	-6,3	-42	-6,6	-43	-6,4	-41	-6,5	-42	-6,6	-43
14	Fonte de S. Tomé	810	-6,2	-40	-6,2	-40	-6,4	-40	-6,3	-40	-6,4	-40	-6,4	-40
15	Fonte do Marrão	565	-6,0	-38	-5,9	-38	-6,2	-38	-5,9	-38	-5,8	-38	-6,0	-39

Nota: Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^2\text{H}$ são expressos em ‰ e reportados a V-SMOW. Os campos sombreados a cinzento claro correspondem aos pontos de amostragem da vertente oriental, os sombreados azul correspondem aos pontos de amostragem da vertente ocidental.

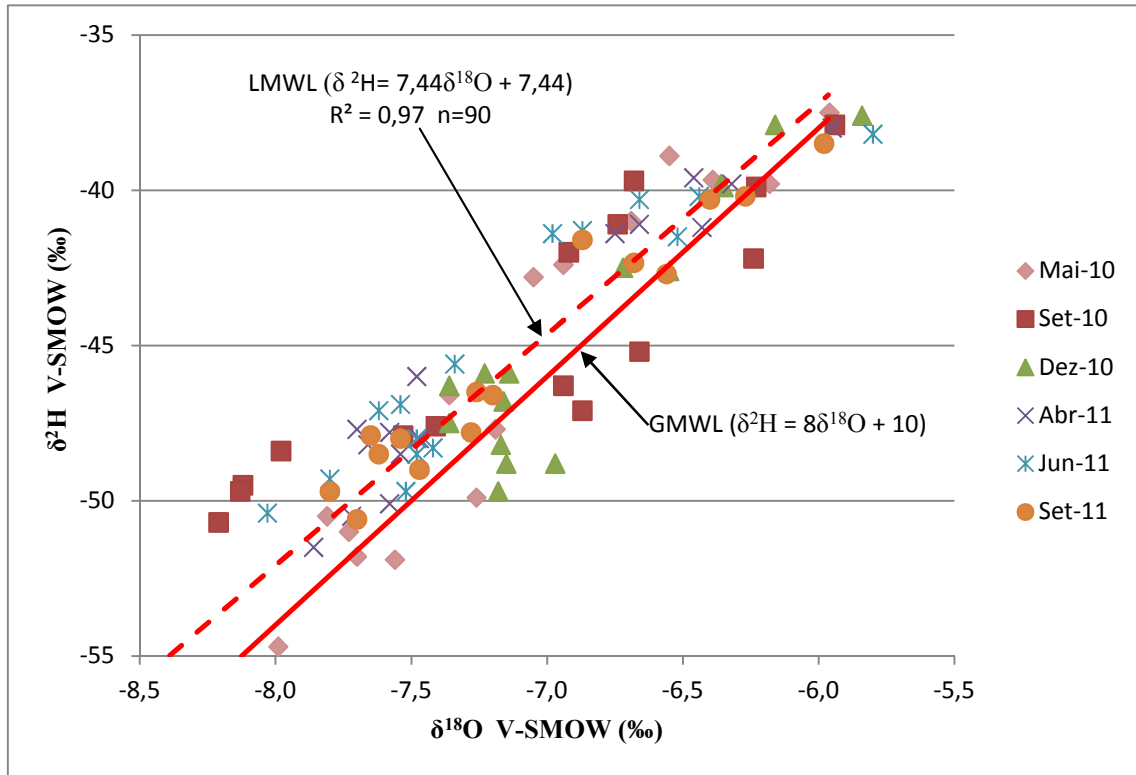


Fig. 6.13. Variação dos teores de $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ (LMWL- Local Meteoric Water Line; GMWL- Global Meteoric Water Line).

Pela análise da reta das águas meteóricas locais (LMWL), verifica-se que esta é, aproximadamente, paralela à GMWL, variando ligeiramente a ordenada na origem. Este desvio indica um empobrecimento em $\delta^{18}\text{O}$ das águas subterrâneas relativamente a SMOW.

Uma vez que as amostras de água analisadas pertencem a sistemas aquíferos relativamente superficiais, recorrendo aos valores de temperatura obtidos *in situ* das amostras de água subterrânea, calcularam-se os gradientes isotópicos da temperatura para este grupo de águas, através das seguintes expressões:

$$\delta^{18}\text{O} = 0,21 T_a - 9,36 (\text{‰})$$

$$\delta^2\text{H} = 1,56 T_a - 62,58 (\text{‰})$$

Os valores obtidos foram de 0,21‰/°C para o $\delta^{18}\text{O}$ e de 1,56‰/°C para o $\delta^2\text{H}$, valores que se aproximam dos mencionados na literatura científica, sendo de salientar que esses correspondem a registros de valores médios de precipitação (amostragem sistemática) e de temperaturas mensais de períodos de tempo contínuos e não de amostras pontuais como no nosso caso de estudo (fig. 6.14.).

De acordo com os resultados apresentados no capítulo 5, a temperatura das águas subterrâneas estudadas acompanham a variação da temperatura do ar ao longo do ciclo anual, o que aponta para uma circulação relativamente superficial. Por outro lado, verificou-se que os resultados hidrogeoquímicos são compatíveis com reduzidos trajetos de circulação e tempos de residência, com interação água-rocha pouco significativa.

Assim, é de supor que a composição isotópica da precipitação da área de recarga e no local de emergência seja similar, uma vez que uma circulação relativamente superficial destas águas subterrâneas não possibilita a homogeneização dos diversos eventos de precipitação.

O quadro 6.2 apresenta o intervalo de variação da temperatura da água observado ao longo do estudo, em cada ponto da rede de monitorização, assim como uma estimativa da profundidade da circulação, tendo em conta o intervalo de variação e o coeficiente de variação da temperatura da água (ver capítulo 5) e as observações de campo.

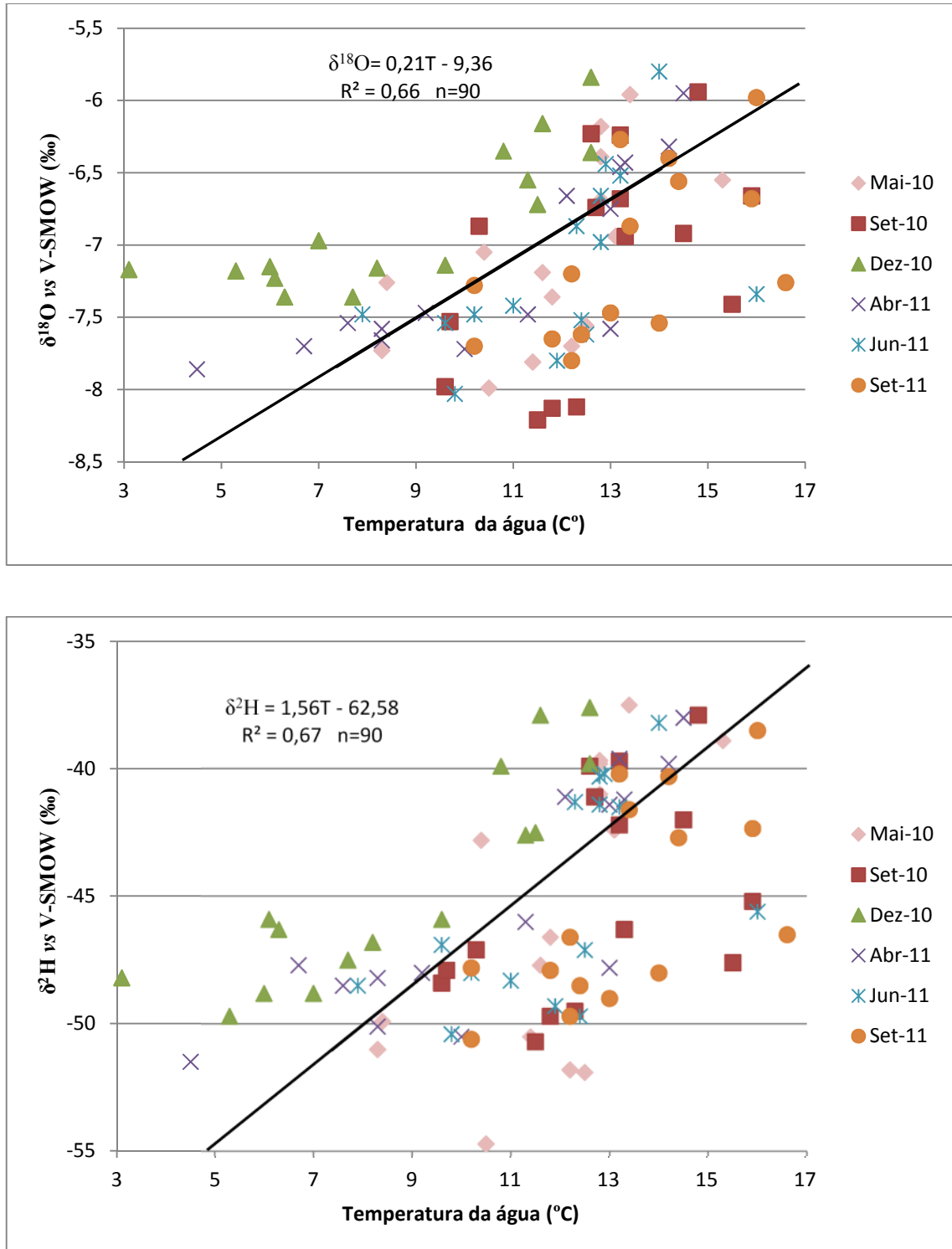


Fig. 6.14. Variação dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^2\text{H}$ com a temperatura da água.

Quadro 6.2. Intervalo de variação da temperatura da água e profundidade de circulação estimada das águas do sector de Seia-Torre-Covilhã.

Ponto de amostragem	Intervalo de variação dos valores medidos da temperatura da água (°C)	“Profundidade” de circulação estimada
Fonte Santa	12,6 – 13,2	Pouco profunda
Fonte da Biquinha	12,6 – 15,9	Pouco profunda
Mina da Rosa Negra	11,5 – 13,4	Pouco profunda
Fonte das Penhas da Saúde	9,2 – 15,5	Muito pouco profunda
Fonte da Saibreira	7,7 – 13,3	Muito pouco profunda
Fonte da Nave de Santo António Sul	7,9 – 10,2	Pouco profunda
Fonte de Espinhaço de Cão	6,0 – 12,4	Pouco profunda
Fonte do Covão do Boi	5,3 – 12,5	Muito pouco profunda
Mina da Torre	3,1 – 13,0	Muito pouco profunda
Fonte dos Perús	7,0 – 10,5	Muito pouco profunda
Nascente da Lagoa Comprida	6,3 – 12,2	Muito pouco profunda
Fonte do Covão do Curral	6,1 – 16,6	Muito pouco profunda
Fonte do Ferreiro	11,3 – 15,3	Pouco profunda
Fonte de S. Tomé	10,8 – 14,2	Pouco profunda
Fonte do Marrão	11,6 – 16,0	Pouco profunda

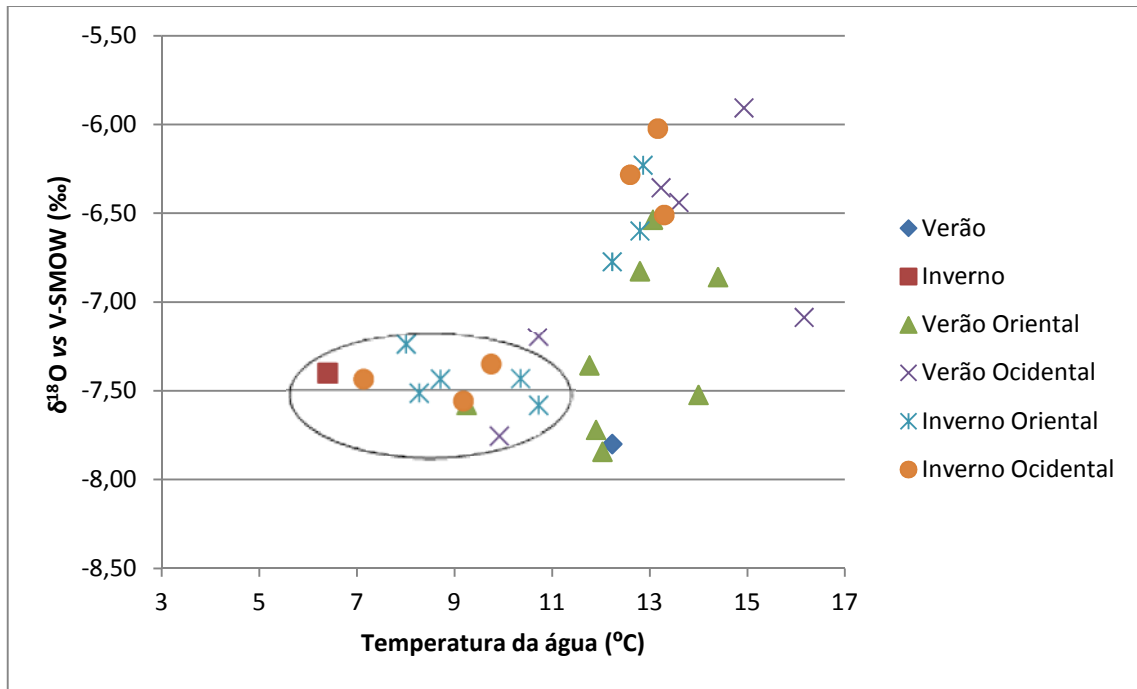


Fig. 6.15. Relação entre $\delta^{18}\text{O}$ com e a temperatura média da água, nos períodos de Inverno e de Verão, para as nascentes da encosta oriental e para as nascentes da encosta ocidental.

Pela análise da figura 6.15., verifica-se que, nas campanhas de inverno, a temperaturas da água mais baixas correspondem valores de $\delta^{18}\text{O}$ mais empobrecidos até atingirem valores próximos de $-7,5\text{‰}$. Este padrão de distribuição (assinalado por uma elipse) pode ser explicado pela movimentação das massas de vapor de água que dão origem à precipitação, uma vez que, à medida que as massas de ar provenientes do oceano Atlântico avançam em direção ao maciço da Serra da Estrela, a composição isotópica da precipitação vai sofrendo alterações por eventos de precipitação sucessivas (fracionamento isotópico). Daqui resulta que, com a ascensão das massas de ar, a precipitação irá ser progressivamente mais empobrecida em ^{18}O e em ^2H . Apesar deste “efeito” na composição isotópica serem mais perceptível nos meses de inverno, nos meses de verão também se verifica, embora de forma menos acentuada.

Araguás-Araguás *et al.* (2000), num estudo realizado com base na rede GNIP, apresentam intervalos de variação do gradiente isotópico vertical entre -0,50 e -0,15‰/100 m para ^{18}O e entre -4 e -1‰/100 m para ^2H . No sector de Seia-Torre-Covilhã, calcularam-se gradientes de -0,1‰/100 m para o ^{18}O e de -1‰/100 m para o ^2H , apresentando assim, em ambos os casos, valores próximos dos limites superiores dos intervalos referidos, o que poderá estar associado à reduzida dimensão da área de investigação (cerca de 25 km²) e às suas condições específicas (fig. 6.16). As expressões que permitiram determinar os gradientes isotópicos verticais de ^{18}O e ^2H , do sector de Seia-Torre-Covilhã, são as seguintes:

$$\delta^{18}\text{O} = -0,001\text{Alt} - 5,534$$

$$\delta^2\text{H} = -0,01\text{Alt} - 33,23$$

Estudos anteriores realizados no âmbito do projeto HIMOCATCH, na região da Serra da Estrela, apresentam um gradiente isotópico de -0,5‰/100m para ^{18}O (Carreira *et al.*, 2011). Valor mais próximo do obtido para o setor de estudo, foi obtido por Espinha Marques *et al.* (2005), aquando da análise do teor isotópico de ^{18}O para a Bacia Zêzere a Montante de Manteigas, tendo registado um gradiente isotópico de -0,14‰/100m.

É ainda de salientar que, com base na projeção dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^2\text{H}$ *versus* a altitude, se verifica que os pontos de amostragem localizados na encosta oriental são isotopicamente mais empobrecidos. Este comportamento encontra-se relacionado com o fracionamento isotópico devido ao relevo assim como à direção e origem das massas de vapor de água que neste sector são predominantemente de origem Atlântica é a chamada “Nortada”.

Na Península Ibérica, a valores de latitudes superiores correspondem valores de $\delta^{18}\text{O}$ mais empobrecidos (Plata Bedmar, 1994 *in*: Carreira *et al.*, 2003). Assim, em regiões mais litorais, os valores de ^{18}O tendem a ser mais enriquecidos diminuindo à medida que se deslocam para o interior devido ao efeito da continentalidade, provocado pelo progressivo empobrecimento das espécies isotópicas mais pesadas nas frentes nublosas devido à condensação preferencial de ^{18}O e ^2H .

No caso do SSTC, uma vez que as latitudes dos pontos amostrados são relativamente próximas, é difícil determinar a influência desse fator nos teores de ^{18}O e ^2H . Contudo, denota-se influência do efeito de barreira climática natural exercida pela cadeia montanhosa da Serra da Estrela dado que, para altitudes próximas, as águas das nascentes da encosta oriental são isotopicamente mais empobrecidas do que as da encosta ocidental.

Com base na análise dos gráficos das figuras 6.17 e 6.18, verifica-se que, a teores mais elevados de HCO_3^- e Cl^- correspondem a teores de ^{18}O e ^2H mais enriquecidos. Com efeito, as águas subterrâneas mais mineralizadas (de entre as não contaminadas) ocorrem nas áreas de menor altitude onde, por um lado, a interação água-rocha é mais intensa (ver capítulo 5) e, por outro lado, a precipitação é isotopicamente mais enriquecida.

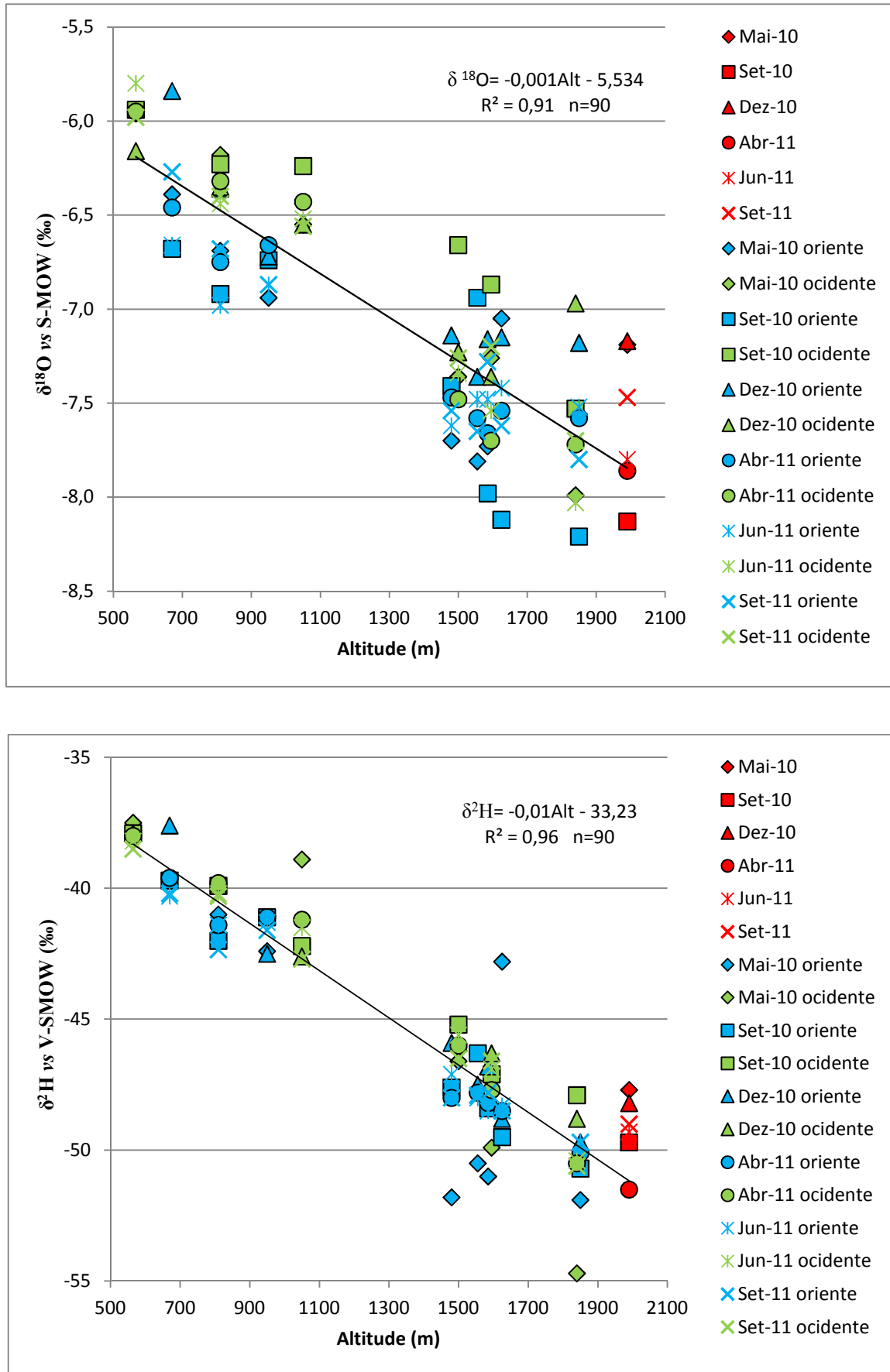


Fig. 6.16. Variação dos teores de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^2\text{H}$ com a altitude dos pontos amostrados.

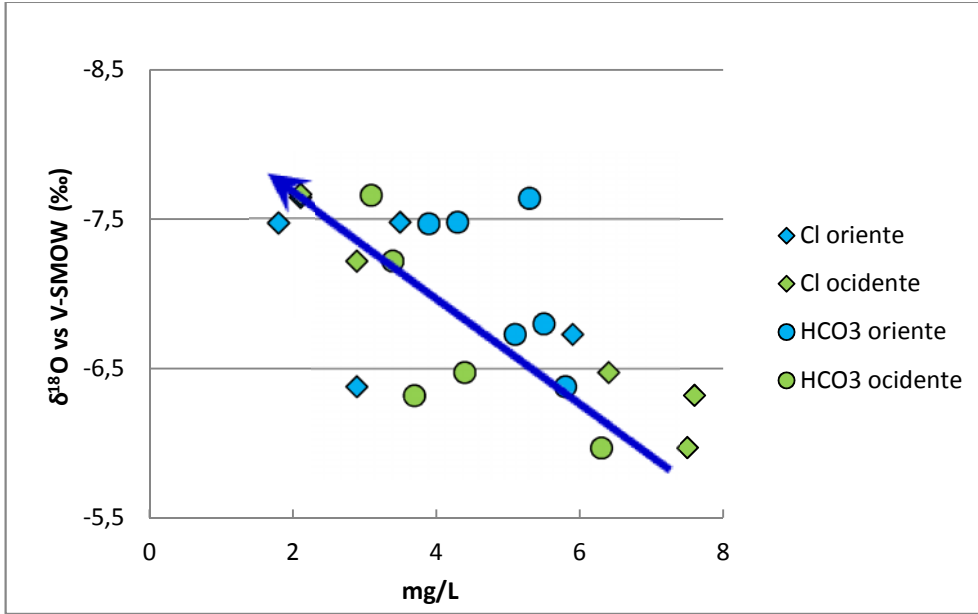


Fig. 6.17. Projeção dos teores de cloreto e bicarbonato *versus* composição isotópica em oxigênio-18 para as nascentes não contaminadas no SSTC.

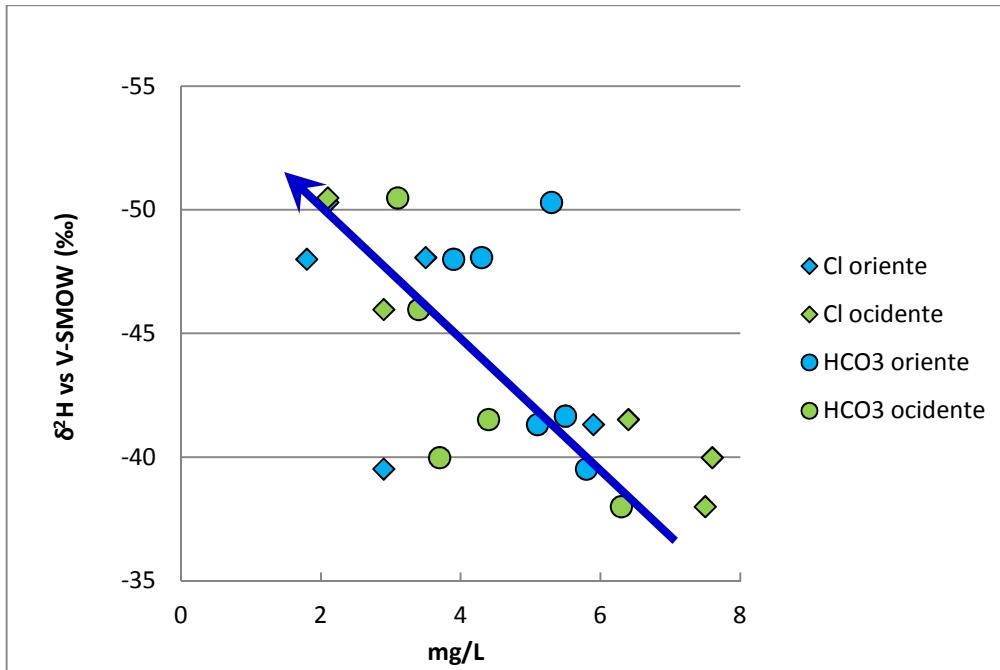


Fig. 6.18. Projeção dos teores de cloreto e bicarbonato *versus* composição isotópica em deutério para as nascentes não contaminadas no SSTC.

Trítio

As águas subterrâneas amostradas apresentam teores de ^3H compreendidos entre $1,0 \pm 0,6$ TU e $5,5 \pm 0,5$ TU (Quadro 6.3.). Da análise aos resultados obtidos ao longo das diversas campanha de amostragem, observa-se uma flutuação dos teores de trítio para o mesmo ponto de amostragem ao longo do ano hidrológico, fato que evidencia o efeito de sazonalidade nas águas de precipitação, e que se traduz na presença de uma componente importante de água recente no sistema. A heterogeneidade de teores de trítio verificados indica sistemas com período de circulação rápido e superficial e com tempo de residência reduzido (fig. 6.19).

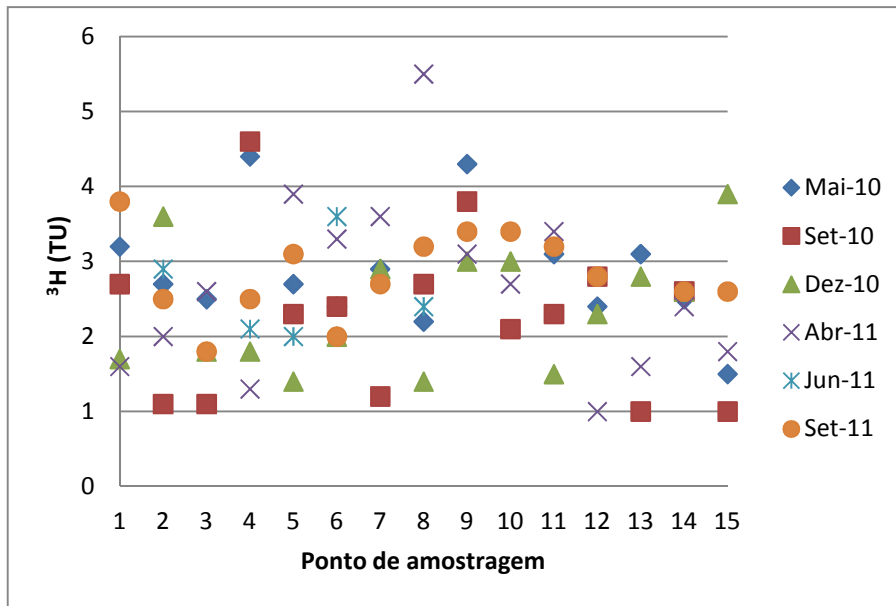


Fig. 6.19. Variação dos teores de ^3H ao longo do tempo para cada ponto de água (ver correspondência dos pontos de água no quadro 6.4).

Quadro 6.3. Resultados das análises isotópicas de trítio das águas do sector de Seia-Torre-Covilhã.

Ponto	Designação	Altitude (m)	Teor em ^3H (TU)						
			Mai-10	Set-10	Dez-10	Abr-11	Jun-11	Set-11	Média
1	Fonte Santa	670	$3,2 \pm 0,6$	$2,7 \pm 0,7$	$1,7 \pm 0,6$	$1,6 \pm 0,6$	---	$3,8 \pm 0,6$	2,6
2	Fonte da Biquinha	810	$2,7 \pm 0,6$	$1,1 \pm 0,6$	$3,6 \pm 0,6$	$2,0 \pm 0,6$	$2,9 \pm 0,5$	$2,5 \pm 0,6$	2,47
3	Mina da Rosa Negra	950	$2,5 \pm 0,6$	$1,1 \pm 0,6$	$1,8 \pm 0,6$	$2,6 \pm 0,4$	---	$1,8 \pm 0,6$	1,96
4	Fonte das Penhas da Saúde	1480	$4,4 \pm 0,7$	$4,6 \pm 0,6$	$1,8 \pm 0,6$	$1,3 \pm 0,6$	$2,1 \pm 0,5$	$2,5 \pm 0,6$	2,78
5	Fonte da Saibreira	1555	$2,7 \pm 0,5$	$2,3 \pm 0,6$	$1,4 \pm 0,6$	$3,9 \pm 0,6$	$2,0 \pm 0,5$	$3,1 \pm 0,6$	2,57
6	Fonte da Nave de Santo António Sul	1585	$2,4 \pm 0,6$	$2,4 \pm 0,6$	$2,0 \pm 0,8$	$3,3 \pm 0,6$	$3,6 \pm 0,5$	$2,0 \pm 0,6$	2,62
7	Fonte de Espinhaço de Cão	1625	$2,9 \pm 0,6$	$1,2 \pm 0,6$	$2,9 \pm 0,6$	$3,6 \pm 0,5$	---	$2,7 \pm 0,6$	2,66
8	Fonte do Covão do Boi	1850	$2,2 \pm 0,7$	$2,7 \pm 0,6$	$1,4 \pm 0,6$	$5,5 \pm 0,5$	$2,4 \pm 0,4$	$3,2 \pm 0,6$	3,48
9	Mina da Torre	1990	$4,3 \pm 0,8$	$3,8 \pm 0,6$	$3,0 \pm 0,6$	$3,1 \pm 0,6$	---	$3,4 \pm 0,6$	3,52
10	Fonte dos Perús	1840	$0,0 \pm 0,6$	$2,1 \pm 0,6$	$3,0 \pm 0,6$	$2,7 \pm 0,6$	---	$3,4 \pm 0,6$	2,8
11	Nascente da Lagoa Comprida	1595	$3,1 \pm 0,6$	$2,3 \pm 0,6$	$1,5 \pm 0,6$	$3,4 \pm 0,6$	---	$3,2 \pm 0,6$	2,7
12	Fonte do Covão do Curral	1500	$2,4 \pm 0,6$	$2,8 \pm 0,6$	$2,3 \pm 0,6$	$1,0 \pm 0,6$	---	$2,8 \pm 0,5$	2,26
13	Fonte do Ferreiro	1050	$3,1 \pm 0,6$	$1,0 \pm 0,6$	$2,8 \pm 0,6$	$1,6 \pm 0,6$	---	n.d.	2,13
14	Fonte de S. Tomé	810	$2,5 \pm 0,6$	$2,6 \pm 0,6$	$2,6 \pm 0,7$	$2,4 \pm 0,6$	---	$2,6 \pm 0,6$	2,54
15	Fonte do Marrão	565	$1,5 \pm 0,6$	$1,0 \pm 0,6$	$3,9 \pm 0,5$	$1,8 \pm 0,6$	---	$2,6 \pm 0,5$	2,16

As variações sazonais provocadas pelo 'spring leak effect', constituem um fator natural fundamental para se compreender o comportamento do trítio na precipitação, sendo responsável por uma entrada sazonal de maior quantidade de trítio na atmosfera e conseqüentemente, nos sistemas aquosos, particularmente visível em sistemas aquíferos pouco profundos. Este efeito é responsável pela concentração superior de trítio nos meses de Primavera relativamente aos meses de Inverno (Gat *et al.*, 2001).

Considerando as concentrações em trítio obtidas nas diferentes campanhas de amostragem no SSTC, é possível também observar uma tendência para a ocorrência de teores em ^3H mais elevados nos meses da Primavera, do que nos meses de Outono/Inverno (fig. 6.20).

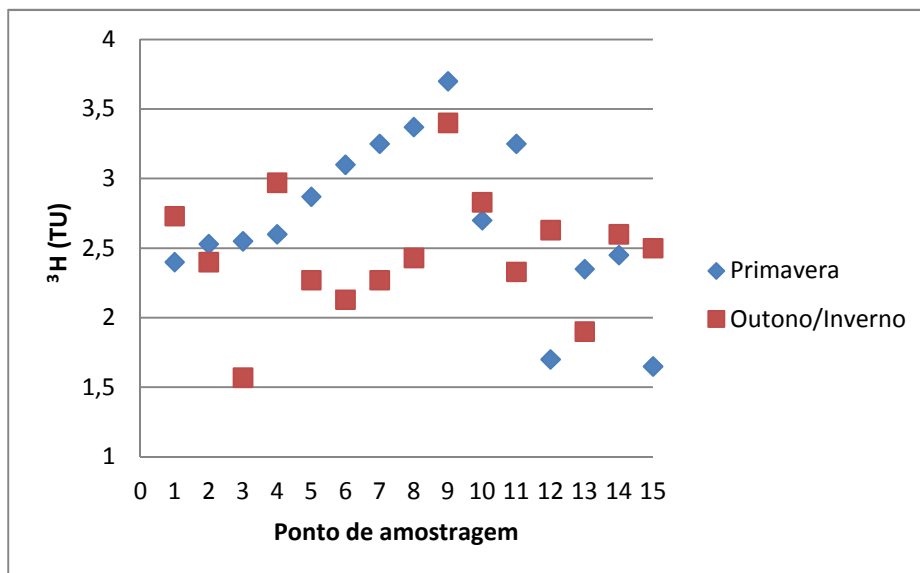


Fig. 6.20. Teores médios de ^3H na Primavera e no Outono/Inverno para cada ponto de água (ver correspondência dos pontos de água no quadro 6.4).

Pela análise da figura 6.21 verifica-se que com o aumento da altitude, há clara tendência para o aumento do teor de trítio. Verifica-se igualmente que para um aumento de 100 m de altitude ocorre um acréscimo de 0,06 TU.

Apesar de ser possível verificar a existência de uma relação entre teores de trítio e a altitude das nascentes do SSTC, os valores são demasiado próximos (quadro 6.3) para se verificar uma relação clara entre os teores deste isótopo e a profundidade de circulação das águas subterrâneas. Este facto poderá estar relacionado com as reduzidas dimensões do circuito subterrâneo.

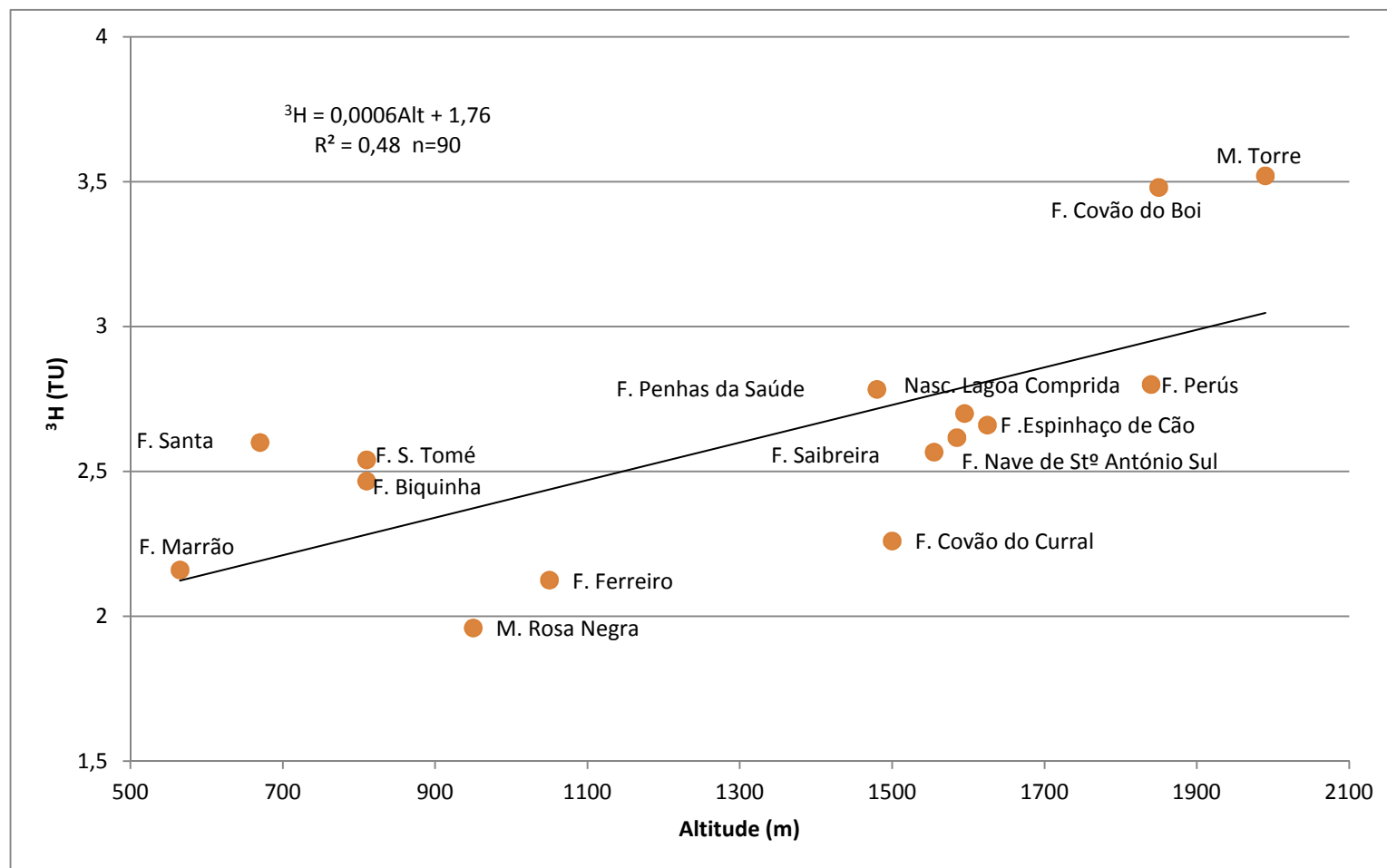


Fig. 6.21. Variação dos teores médios de ^3H com a altitude das nascentes do SSTC.

7. Contaminação das águas subterrâneas

7.1. Introdução

Tendo em conta ameaças globais como a superpopulação, a contaminação, a sobreexploração de recursos naturais, entre outros grandes riscos para o planeta, resulta clara a urgência em repensar cuidadosamente a gestão dos recursos hídricos de forma a satisfazer as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades, ou seja, praticando a exploração sustentável dos recursos.

Atualmente, uma das grandes preocupações da humanidade diz respeito à qualidade dos recursos hídricos, dada a urgente necessidade de preservação da qualidade da água. O combate à contaminação destes recursos tem-se revelado um verdadeiro desafio na manutenção da sustentabilidade das reservas de água potável, sobretudo nas últimas décadas (Guo & Wang, 2009).

Reconhecidas pela UNESCO como importantes reservas de água de elevada qualidade e em quantidade apreciável, as zonas de montanha são consideradas áreas estratégicas do ponto de vista socioeconómico, de onde resulta a crescente necessidade de preservação dos seus recursos (Aureli, 2002; UNESCO IHP-VI Programme: <http://www.unesco.org>).

Os recursos hídricos de montanha têm-se revelado indispensáveis para o abastecimento de água às populações, à agricultura e à indústria das regiões envolventes e ao seu desenvolvimento (ex. Viviroli *et al.*, 2010; Espinha Marques *et al.*,

2011a,b). Assim, dado que uma substancial quantidade de água potável disponível tem origem nas montanhas, a correta gestão ambiental dessas regiões tem vindo a tornar-se cada vez mais importante (ex. Viviroli & Weingartner, 2008; Espinha Marques *et al.*, 2009; Carvalho *et al.*, 2012).

A contaminação das águas subterrâneas é, atualmente, um dos temas de toxicologia ambiental mais relevantes para a comunidade científica e para as autoridades governamentais (ex. Ojeu, 2006; Afonso *et al.*, 2010).

O estudo sobre a contaminação das águas subterrâneas no sector de Seia – Torre – Covilhã teve como propósito avaliar as alterações hidrogeoquímicas devidas às operações de limpeza de neve nas estradas (com a aplicação, em especial, de cloreto de sódio), procurando-se desenvolver, com o auxílio de técnicas hidrogeofísicas, um modelo conceptual do respectivo processo de contaminação. Foi, igualmente, investigada a ocorrência de modificações hidrogeoquímicas em consequência da infiltração das águas de escorrência das estradas (não relacionadas com a limpeza da neve) e dos fogos florestais. Por fim, apresenta-se um estudo sobre a presença de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP) originados, igualmente, pelos fogos florestais.

7.2. Modificações hidrogeoquímicas das águas subterrâneas por processos de contaminação

A hidrogeoquímica desempenha um importante papel na avaliação da qualidade da água fornecida por um determinado aquífero, bem como na determinação das suas características químicas, possibilitando também a determinação da origem de possíveis contaminações (Freeze & Cherry, 1979).

Existem diversos tipos de contaminantes dos sistemas aquíferos, de origem natural ou antrópica, tais como: produtos químicos perigosos, metais pesados, organismos patogênicos, nutrientes, derivados do petróleo, materiais radioativos, e sedimentos (Keller, 2000).

Neste subcapítulo são considerados três tipos de contaminação que geram modificação hidrogeoquímicas: as operações de limpeza de neve nas estradas; a infiltração de águas de escorrência dos pavimentos rodoviários; a ocorrência de fogos florestais.

7.2.1. Operações de limpeza de neve

A ocorrência de precipitação atmosférica sob a forma de neve pode causar grandes transtornos ou até, mesmo, paralisar a atividade económica. Assim, a necessidade de manter as estradas transitáveis representa uma preocupação constante por parte das autoridades (Carvalho *et al.*, 2012).

Desta forma, com o intuito de manter a transitabilidade das estradas, podem ser utilizados processos químicos e/ou mecânicos. Diversas substâncias químicas podem ser utilizadas na limpeza da neve e gelo, tais como: o cloreto de sódio (NaCl), o cloreto de magnésio (MgCl₂), o cloreto de cálcio (CaCl₂), o cloreto de potássio (KCl), o acetato de potássio (KC₂H₃O₂), o acetato de cálcio (Ca(C₂H₃O₂)₂) e magnésio Mg(C₂H₃O₂)₂, o carbonato de cálcio (CaCO₃), o carbonato de magnésio (MgCO₃), o ácido acético (CH₃COOH), o propionato de cálcio (Ca(CH₃CH₂COO)₂) e magnésio (Mg(CH₃CH₂COO)₂), e o formato de potássio (HCOOK) (ex: TRB, 1991; Granato, 1996; EPA, 2002; Rasa *et al.*, 2006).

Uma vez que os sais são capazes de baixar o ponto de fusão da neve e gelo, a sua utilização na limpeza das estradas apresenta-se como um método rápido, eficaz e

relativamente económico. Tal como foi referido, existem várias substâncias químicas capazes de promover a limpeza da neve e gelo mas, devido ao baixo custo económico, eficiência e facilidade de aplicação, o cloreto de sódio é o sal mais utilizado para este efeito (Carvalho *et al.*, 2012).

Assim, o processo de limpeza de neve e gelo das estradas constitui uma potencial fonte de contaminação dos solos, águas superficiais e subterrâneas, bem como da flora e fauna localizadas nas bermas das estradas (ex. Hawkins & Judd, 1973; TRB, 1991; EPA, 2002 ; Godwin *et al.*, 2003; Espinha Marques *et al.*, 2005; Rodrigues *et al.*, 2010). Dada a elevada solubilidade de sais como o cloreto de sódio, a sua presença, para além de poder afetar a qualidade e sabor da água para consumo humano, pode também inviabilizar a vida nos ecossistemas de água doce a plantas e animais (ex. WTC, 1997; ET, 2010).

O cloreto de sódio, após aplicado, dissolve-se numa proporção de cerca de 40% de sódio e 60% de cloreto na água da fusão da neve e gelo entrando depois no ambiente (USGS, 2010).

Devido à sua elevada solubilidade, mobilidade e densidade, o cloreto, uma vez presente nas massas de água, tem tendência a depositar-se no fundo das mesmas podendo, mesmo, inviabilizar a vida aquática acima de concentrações de 230 mg/L. Concentrações de cloreto desta ordem não prejudicam a saúde humana mas podem afetar o sabor da água (USGS, 2010).

Por seu lado, o ião sódio não apresenta uma tão elevada mobilidade no ambiente como o cloreto. Contudo, é capaz de intervir em trocas iónicas no solo, libertando nutrientes tais como o cálcio, o magnésio e o potássio para as águas subterrâneas e superficiais. A contaminação das águas por sódio pode representar uma preocupação para a saúde pública uma vez que pode causar problemas a indivíduos com dietas hipossódicas devido à hipertensão arterial. Esta preocupação é

tão relevante nos Estados Unidos, que a EPA – *United States Environmental Protection Agency*, estabeleceu como limite uma concentração de 20 mg/L para águas de abastecimento público (USGS, 2010).

7.2.2. As águas de escorrência de estradas

Têm sido realizados diversos estudos sobre o impacto ambiental das águas de escorrência das estradas sobre os sistemas hídricos, nomeadamente no Noroeste da Europa, América do Norte e Japão, os quais vieram a comprovar que estas vias de comunicação são fonte de contaminação da água com carácter linear (ex. Mikkelsen *et al.*, 1996; Bohemen & Van de Laak, 2003; LNEC, 2006; Murakami *et al.*, 2007). Também no território português a tomada de consciência da necessidade de se conhecer a qualidade destes efluentes tem vindo a aumentar (Barbosa, 2002 *in* LNEC, 2006).

Existem vários contaminantes nas águas de escorrência das estradas, como, por exemplo: materiais do pavimento da própria rodovia; produtos de combustão; perdas dos sistemas de lubrificação; desgaste dos pneus e dos componentes dos veículos automóveis; componentes provenientes da contaminação atmosférica; sedimentos da erosão do solo; contaminantes industriais; lixos e matéria orgânica (ex. Bohemen & Van de Laak, 2003; Barbosa e Hvitved-Jacobsen, 2000, *in*: LNEC, 2006). As espécies químicas provenientes dos referidos contaminantes são, em especial, metais pesados como o chumbo, o zinco, o cobre, o cádmio, o crómio e a platina e os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (ex. Bohemen & Van de Laak, 2003; Murakami *et al.*, 2007). O impacto provocado por estes efluentes sobre o sistema hídrico, pode dever-se a ocorrências habituais, como os poluentes acumulados no pavimento, ao tráfego e comportamento dos utentes, ou a ocorrências pontuais como na manutenção/reparação das vias e taludes ou derrames acidentais (LNEC, 2006).

A quantidade de contaminantes é condicionada pela intensidade do tráfego bem como pelo tipo de pavimento da própria estrada (Bohemen & Van de Laak, 2003). A pluviosidade, mais particularmente, a sua quantidade e distribuição, é responsável pelo transporte dos contaminantes acumulados nas rodovias e, conseqüentemente, pela degradação da qualidade da água e dos ecossistemas (Mikkelsen *et al.*, 1996; Bohemen & Van de Laak, 2003). No quadro 7.1. encontram-se sintetizados os principais contaminantes presentes nas águas de escorrência das estradas e as respectivas origens.

Tal como foi anteriormente referido, as águas de escorrência das estradas têm sido alvo de estudo em diversos países (ex. Mikkelsen *et al.*, 1996; Bohemen & Van de Laak, 2003; Murakami *et al.*, 2007), sendo de destacar o projeto POLMIT – *Pollution of groundwater and soil by road and trafic sources: dispersal mechanisms, pathways and mitigation measures*, realizado com base numa parceria entre sete laboratórios de Estados Membros da União Europeia de entre os quais o Laboratório Nacional e Engenharia Civil (LNEC). No âmbito desse projeto, foram retiradas algumas conclusões importantes acerca da avaliação da contaminação das águas de escorrência no solo e água subterrânea.

Verificou-se que o tipo de solo e a hidrogeologia local influenciam a migração de contaminantes, mais especificamente, que as características químicas das águas subterrâneas interferem na mobilidade de determinados elementos químicos, sobretudo nos metais pesados (Leitão *et al.*, 2000). Outra conclusão retirada desse estudo foi a existência de um padrão de migração da contaminação relacionado com a qualidade das águas de escorrência ao longo do ano, ou seja, ocorre uma influência da utilização de sais para o degelo sobre a mobilização de metais pesados. De tal forma que estes autores referem que, provavelmente, o aumento das concentrações de sódio, cálcio e cloreto são responsáveis pela mobilização de metais pesados (Leitão *et al.*, 2000).

Quadro 7.1. Contaminantes presentes em ambiente rodoviário e suas principais origens (adaptado de James, 1999; Sansalone e Buchberger, 1997 e Leitão *et al.*, 2000a, *in* LNEC, 2006).

Tipo de contaminante	Principais origens							
	Pneus	Travões	Combustíveis e/ou óleo do motor	Materiais da viatura	Pavimento	Lixos	Guardas de segurança	Solo, poeiras da carroçaria, vegetação, excrementos de animais, fertilizantes
Metais pesados								
Cádmio	x	x						
Chumbo	x	x	x					
Cobre	x	x		x				
Crómio	x	x		x				
Ferro	x			x				
Níquel	x							
Vanádio			x					
Zinco	x	x	x	x			x	
Hidrocarbonetos			x					
HAP¹			x	x	x			
Nutrientes			x					x
Matéria orgânica					x	x		x
Partículas	x	x			x			x
Microrganismos						x		x
Sais²								x

¹ Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos

² Sais utilizados para promover a fusão da neve e do gelo

7.2.3. Fogos florestais

Fogos são fenómenos físico-químicos de combustão a altas temperaturas, como resultado da combinação de um comburente e um combustível, do qual resulta a emissão de calor, luz e, habitualmente, chama (ex. Statheropoulos & Karma, 2007; Leitão, 2007 *in* LNEC, 2009). São processos dinâmicos, previsíveis ou incertos, responsáveis pela reciclagem de matéria orgânica (USDA, 2005). No caso dos fogos florestais, geralmente, o comburente é o oxigénio, sendo o combustível o húmus, as herbáceas, os arbusto e as árvores (LNEC, 2009).

Os fogos florestais constituem um dos maiores problemas de gestão ambiental no território nacional, sendo Portugal o país do Sul da Europa com maior densidade de ocorrências (Moreira *et al.*, 2010 *in*: Connor, 2012). Segundo ICN (2006), os fogos são mais frequentes em áreas protegidas, sendo assim considerados importantes ameaças para a conservação da natureza e biodiversidade. Concretamente, o Parque Natural da Serra da Estrela constitui a área natural mais propensa à ocorrência de fogos em Portugal Continental (ICN, 2006).

O fogo tem sido um importante componente dos ecossistemas da Serra da Estrela, sendo, mesmo, responsável pela modelação das comunidades vegetais da montanha (Connor *et al.*, 2012). A alteração de fatores climáticos tem induzido o aumentos de incidência de fogos florestais nesta região. Apesar de na região serem observados períodos de longa estabilização após períodos de fogos, a variedade de respostas da vegetação no passado sugere que as alterações climáticas e a ocupação do solo podem ter resultados imprevisíveis no futuro (Connor *et al.*, 2012).

A forma como os fogos afetam, com maior ou menor intensidade, os processos do Ciclo Hidrológico depende principalmente da sua severidade, ou seja, da quantidade de combustível consumido e das temperaturas atingidas (USDA, 2005). Assim, quanto mais severo for um fogo, maior a quantidade de combustível consumido,

maior a quantidade de nutrientes libertados, maior a suscetibilidade dos solos à erosão e maior o fluxo de nutrientes que podem afetar a qualidade da água.

O impacto dos fogos florestais sobre a qualidade dos recursos hídricos depende de múltiplos factores entre os quais se destacam as características das bacias hidrográficas (relevo, clima, geologia, tipo e ocupação vegetal do solo e percentagem de coberto vegetal ardido) e as características do fogo (frequência, abrangência, intensidade e duração) (ex. USDA, 2005; LNEC, 2009).

De acordo com Rannalli (2004), *in* LNEC 2009, o efeito dos fogos florestais sobre a qualidade da água acentua-se quando determinados factores se conjugam: elevada severidade do fogo, com combustão de grande quantidade de matéria orgânica; ocorrência de ventos fortes durante o fogo; ocorrência de precipitação atmosférica elevada no período pós-incêndio; bacias hidrográficas com relevos acentuados e solos pouco espessos.

Genericamente, os principais impactes dos fogos sobre a qualidade dos recursos hídricos são: a introdução de sedimentos provenientes da camada superficial impermeabilizante que, frequentemente, se forma e que impede a infiltração da precipitação; o potencial aumento de teor de nitrato; a possibilidade de introdução de metais pesados provenientes dos solos e dos materiais geológicos das áreas ardidas; a aplicação de retardadores químicos utilizados no combate ao fogo os quais podem atingir níveis tóxicos para os organismos aquáticos (USDA, 2005).

O quadro 7.2 apresenta uma síntese, elaborada por LNEC 2009, com base nos resultados de diversos estudos, relativa às alterações físicas e químicas que ocorrem nos solos e nas águas em consequência dos fogos florestais.

Quadro 7.2. Principais alteração da qualidade dos solos e águas como resultado de fogos florestais (extraído de LNEC, 2009).

Espécie química	Alteração Solos	Alteração Água	Origem
Carbono	↑ ou ↓	↑	Cinzas e queima do solo
Cálcio	↑	↑	Cinzas e solo
Magnésio	↑	↑	Cinzas
Sódio	↑ ou →		Sem informação
Potássio	↑ ou ↓	↑	Cinzas e solo
Azoto	↑ (fogos de baixa intensidade) ou ↓ (fogos intensos)	↑ ou ↓	Cinzas
Sulfato	→	→	Sem informação
Fósforo	↑	↑	Cinzas
Manganés	↑	↑	Cinzas de resinosas; quebra de complexos orgânicos de Mn do solo
Cobre	Ligeiro ↑		Mobilizado pela queima do solo
Zinco	Ligeiro ↑		Mobilizado pela queima do solo

Nota: ↑ aumento da concentração; ↓ diminuição da concentração; → concentração sem alterações.

O grau de intensidade dos fogos é responsável pelo potencial aumento de carbono nas águas de escorrência pós-incêndio como resultado da queima da matéria vegetal. Por sua vez, nos solos, pode ocorrer diminuição da concentração de carbono por combustão da matéria orgânica superficial do solo, ou aumento, por excesso de carbono orgânico dissolvido (ex. USDA, 2005; LNEC, 2009). As espécies catiónicas Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} e por vezes Na^{+} , tendem a sofrer um aumento de concentração nas águas de escorrência, devido ao efeito das cinzas e dos solos queimados, sobretudo durante o primeiro ano após o fogo, observando-se uma diminuição gradual das concentrações nos anos subsequentes, devido à diluição pela precipitação (LNEC, 2009).

No que respeita ao azoto, tanto pode ocorrer aumento de concentração deste elemento em solos e águas como a sua diminuição. Assim, quando o fogo é de grande intensidade, ocorre volatilização do N no solo o que leva à sua diminuição, por outro lado, o aumento de concentração deste elemento regista-se quando o coberto vegetal consumido pelo fogo é reduzido (USDA, 2005; LNEC, 2009).

Apesar da concentração de fósforo aumentar habitualmente em solos e águas de áreas ardidas, devido à redução das necessidades biológicas, da sua mobilização pela queima e pelos processos de precipitação e fixação química do P^{3+} solúvel, a sua presença nas águas continua reduzida devido à sua fraca propensão para ser lixiviado (LNEC, 2009).

Embora sejam registados pequenos aumentos de concentração de sulfato, devido ao efeito dos fogos, os resultados obtidos não permitem retirar informações conclusivas acerca do comportamento deste elemento. O aumento da concentração de metais pesados (Mn^{2+} , nas águas e solos, e Cu^+ e Zn^{2+} , nos solos) deve-se à mobilização por complexação ligada à matéria orgânica do solo e à mobilização das formas reduzidas do metal (LNEC, 2009).

7.2.4. Modificações hidrogeoquímicas das águas subterrâneas por processos de contaminação no setor de Seia-Torre-Covilhã

Como já foi referido, a utilização de sais na limpeza de neve e gelo das rodovias em áreas frequentemente afetadas por precipitação sobre a forma de neve, podem causar impactes sobre as águas subterrâneas. A Serra da Estrela não constitui exceção à ocorrência destes efeitos. Nesta região, é usual a aplicação de sais, em especial o cloreto de sódio e, em menor medida, o cloreto de cálcio, para manter transitáveis as rodovias locais (ex. Carvalho *et al.*, 2012). O material utilizado para a

promoção do degelo nas estradas do Parque Natural da Serra da Estrela é sal-gema constituído por cerca de 93% de NaCl, com origem na mina de Loulé (Zbyszewsky e Barreto de Faria, 1971). Segundo estes autores, estão presentes outros compostos, em concentrações variáveis, onde se destacam: KCl, $MgCl_2$, $CaCl_2$, $CaSO_4$ e $MgSO_4$.

A figura 7.1 representa as rodovias situadas na área de maior altitude do SSTC, onde as operações de limpeza de neve e gelo são mais frequentes, ou seja, no subsetor de Nave de Santo António – Torre – Lagoa Comprida. O quadro 7.3 compara os teores médios dos iões sódio, cálcio, magnésio e cloreto determinados em 5 amostras de sal-gema analisadas entre 2009 e 2011 no Laboratório Nacional de Energia e Geologia – LNEG, na Unidade de Ciência e Tecnologia Mineral, com os teores dos mesmos iões em amostras provenientes de pontos de água situados a montante (Fonte Santa, Fonte da Biquinha, Mina da Rosa Negra, Fonte das Penhas da Saúde, Fonte da Saibreira, Fonte do Covão do Boi, Fonte dos Perús, Fonte do Covão do Curral, Fonte do Ferreiro, Fonte de São Tomé, Fonte do Marrão) e a jusante (F. Nave de Santo António Sul, F. Espinhaço de Cão, Mina da Torre e Nascente da Lagoa Comprida) das rodovias (fig. 7.1).

Quadro 7.3. Composição química do sal-gema de Loulé e das águas amostradas a montante e jusante do SSTC.

Iões	Sal-gema (média; n=5)	Águas de nascentes a montante das rodovias (média; n= 11)	Águas de nascentes a jusante das rodovias (média; n= 4)	VP
Sódio	35	4,0	30,8	200
Cálcio	1,2	1,4	11,1	<100
Potássio	s.i.	1,0	0,9	s.i.
Magnésio	0,3	0,5	1,2	<50
Cloreto	57	4,2	61,2	250

Nota: s.i. sem informação. Teores em % (sal-gema) e mg/L (água). Valor paramétrico para água destinada ao consumo humano (mg/L), definido no Decreto-Lei nº 306/2007.

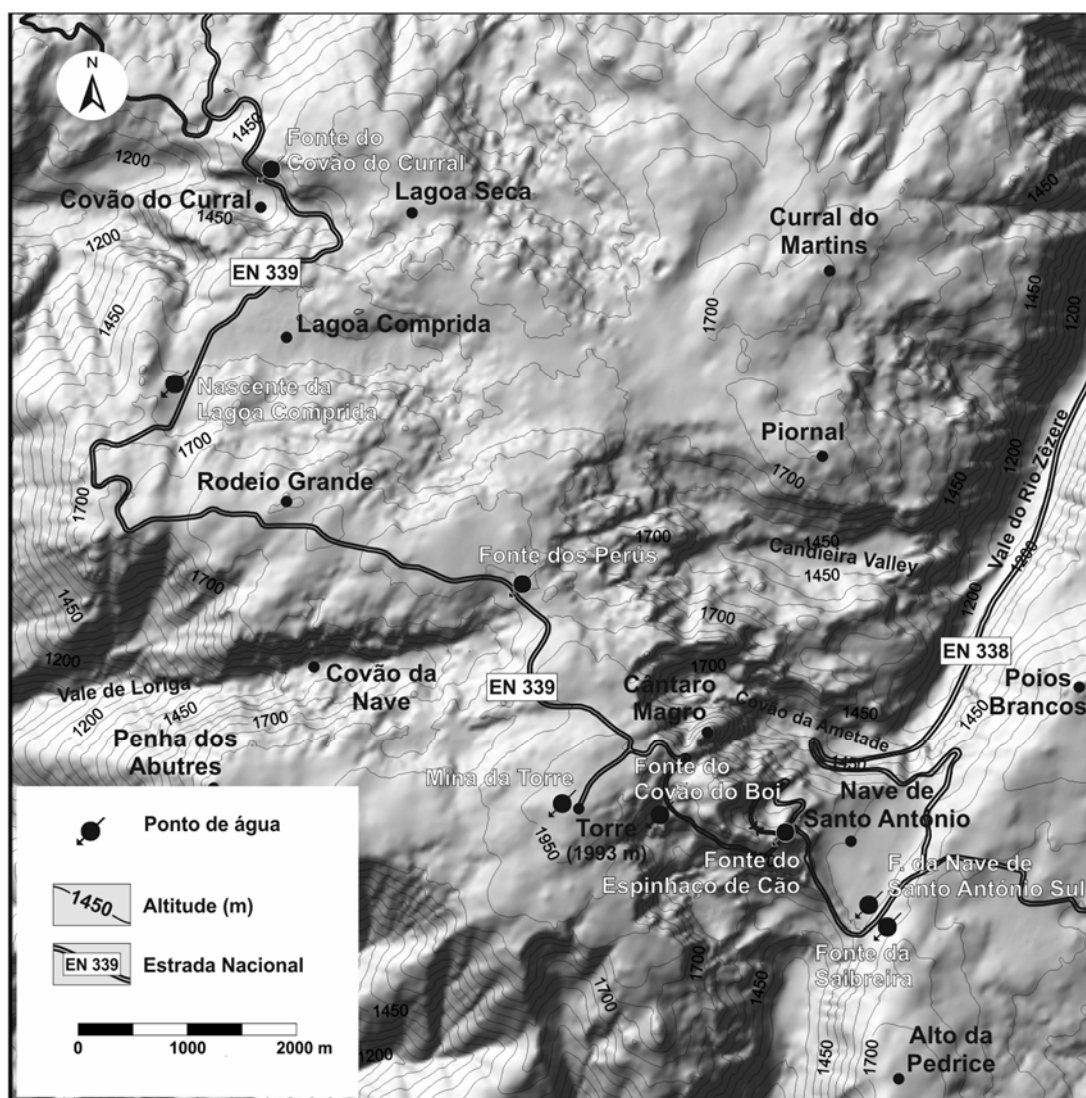


Fig. 7.1. Localização das rodovias no subsector Lagoa Comprida – Torre – Nave de Santo António (modificado de Carvalho *et al.*, 2012).

Tendo em consideração a utilização de sais na limpeza das rodovias, é de supor que as águas provenientes de pontos de água situados a jusante das rodovias apresentem um aumento dos teores de sódio, cálcio e cloreto relativamente às águas de pontos situados a montante.

Com efeito, o valor médio da concentração de sódio nas amostras de pontos de água situados a jusante das estradas é aproximadamente 7 vezes superior ao valor médio nas amostras de pontos de água situados a montante. Este incremento é 15 vezes superior no caso do cloreto, de 8 vezes no caso do cálcio e de cerca de duas

vezes no caso do magnésio. Nos teores em potássio, não se observa variação significativa. No caso do cálcio, há que lembrar que este é aplicado quer sob forma de sal-gema quer sob forma de CaCl. Apesar dos teores relativamente elevados nas águas de nascentes localizadas a jusante das estradas, nenhum dos iões apresenta teores acima do estipulado para água para consumo humano de acordo com o Anexo I do Decreto-Lei nº306/2007 (quadro 7.3).

A contaminação das águas subterrâneas pela infiltração de águas de escorrência dos pavimentos rodoviários deve-se, sobretudo, aos metais pesados. Os principais metais pesados produzidos por estas fontes de contaminação são o cádmio, o crómio, o cobre, o chumbo e o zinco. Conforme se verifica no quadro 7.4, existe uma maior concentração destes elementos químicos nas águas amostradas a jusante do que a montante da estrada.

Este tipo de contaminação das águas subterrâneas pode ser agravado pelas operações de limpeza de neve e gelo. Com efeito, o aumento da concentração dos iões sódio, cálcio e cloreto, que constituem os sais mais vulgarmente utilizados nos trabalhos de degelo nas rodovias, pode mobilizar metais pesados, aumentando a sua concentração nas águas subterrâneas (Leitão *et al.*, 2000). No entanto, nenhum dos metais pesados considerados apresenta teores acima do estipulado para água para consumo humano de acordo com o Decreto-Lei nº306/2007, apresentando também teores abaixo do valor limite de emissão para a descarga de águas residuais com estabelecido no Decreto-Lei nº236/1998 (ver quadro 7.4).

Os resultados analíticos obtidos ao longo do presente trabalho indicam, com clareza, que os sais utilizados para a limpeza da neve contaminam as águas subterrâneas.

Quadro 7.4. Concentração de metais pesados em amostras de sal-gema e águas do SSTC a montante e jusante da estrada.

Metais pesados	Sal-gema	Nascentes a montante das rodovias (média; n= 11)	Nascentes a jusante das rodovias (média; n= 4)	VLE	VP
Crómio*	2,80*	0,0005	0,00095	2,0	0,05
Cobre*	1,20*	0,00064	0,00095	1,0	2,00
Zinco*	2,60*	0,00509	0,03488	s.i.	s.i.
Cádmio**	0,03**	0,00006	0,0004	0,2	0,005
Chumbo***	2,50***	0,0001	0,00013	1,0	0,025

Nota: s.i. sem informação. Teores em % (sal-gema) e mg/L (água). (*) n=1; (**) n=6; (***) n=5. Valor limite de emissão (VLE) na descarga de águas residuais (mg/L), definido no Anexo XVIII do Decreto-Lei nº 236/1998. Valor paramétrico (VP) para água destinada ao consumo humano (mg/L), definido no Anexo I do Decreto-Lei nº 306/2007

O gráfico da figura 7.2., representa a relação Na/Cl ao longo das diferentes campanhas de amostragem. Conforme é possível observar, as nascentes localizadas a jusante das estradas (linhas vermelhas) apresentam um valor do rácio Na/Cl mais constante e, normalmente, mais reduzido ao longo das várias campanhas do que as demais, o que traduz uma maior relação entre as duas espécies químicas. Tal resultado, permite-nos concluir que a entrada de sódio e cloreto no sistema hidrogeológico de cada uma destas águas se faz em simultâneo.

Nos gráficos das figuras 7.3. e 7.4. observa-se a existência de uma forte correlação positiva entre os teores de cloreto e de sódio e a condutividade elétrica das águas de nascentes situadas a jusante da estrada, (ou seja, águas contaminadas), enquanto que, no caso dos pontos de águas situados a montante da estrada, com água menos mineralizadas e não contaminadas, a correlação é, igualmente, positiva mas mais fraca.

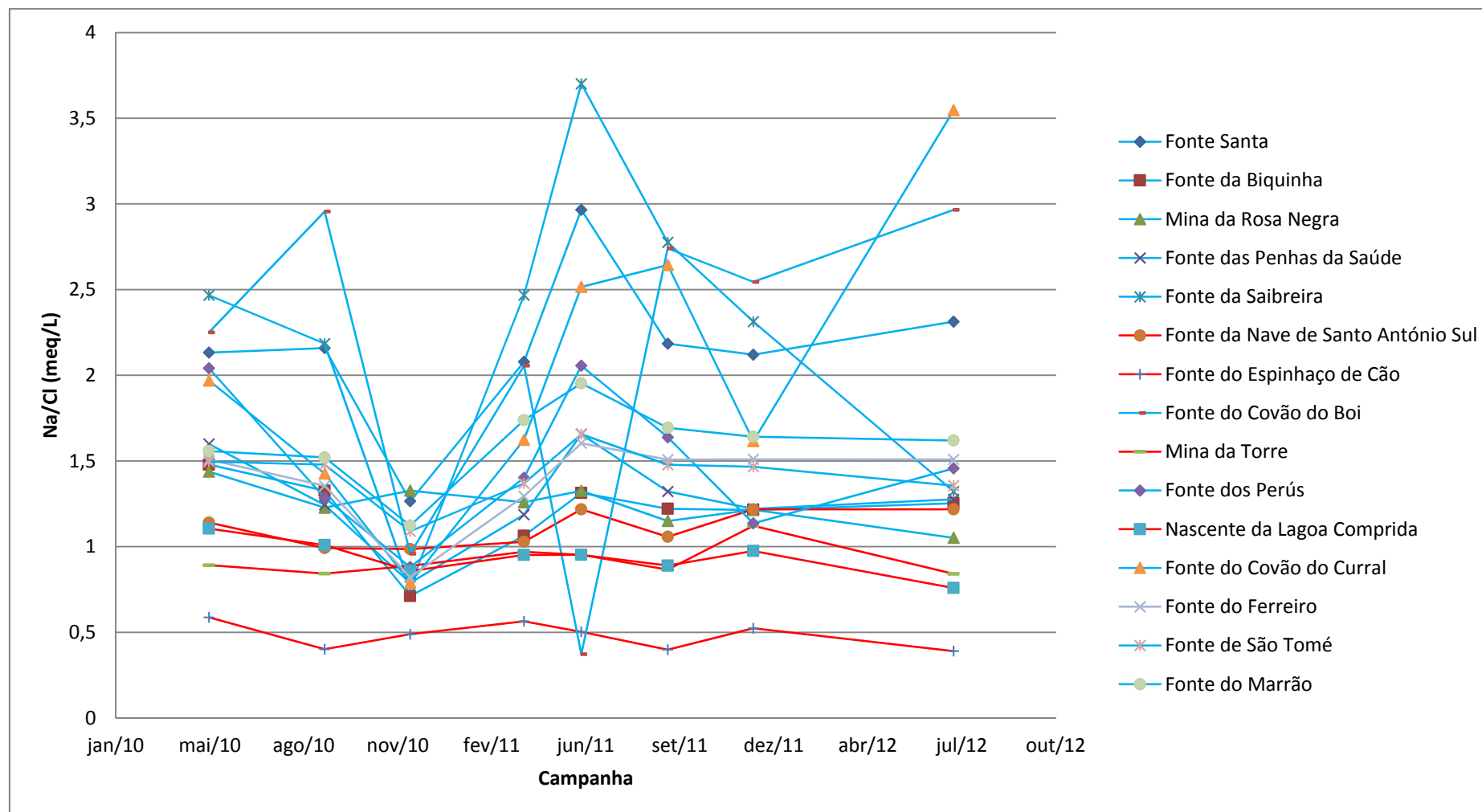


Fig. 7.2. Gráfico representativo da evolução temporal da relação Na/Cl de todos os pontos de água subterrânea entre Maio de 2010 e Julho de 2012.

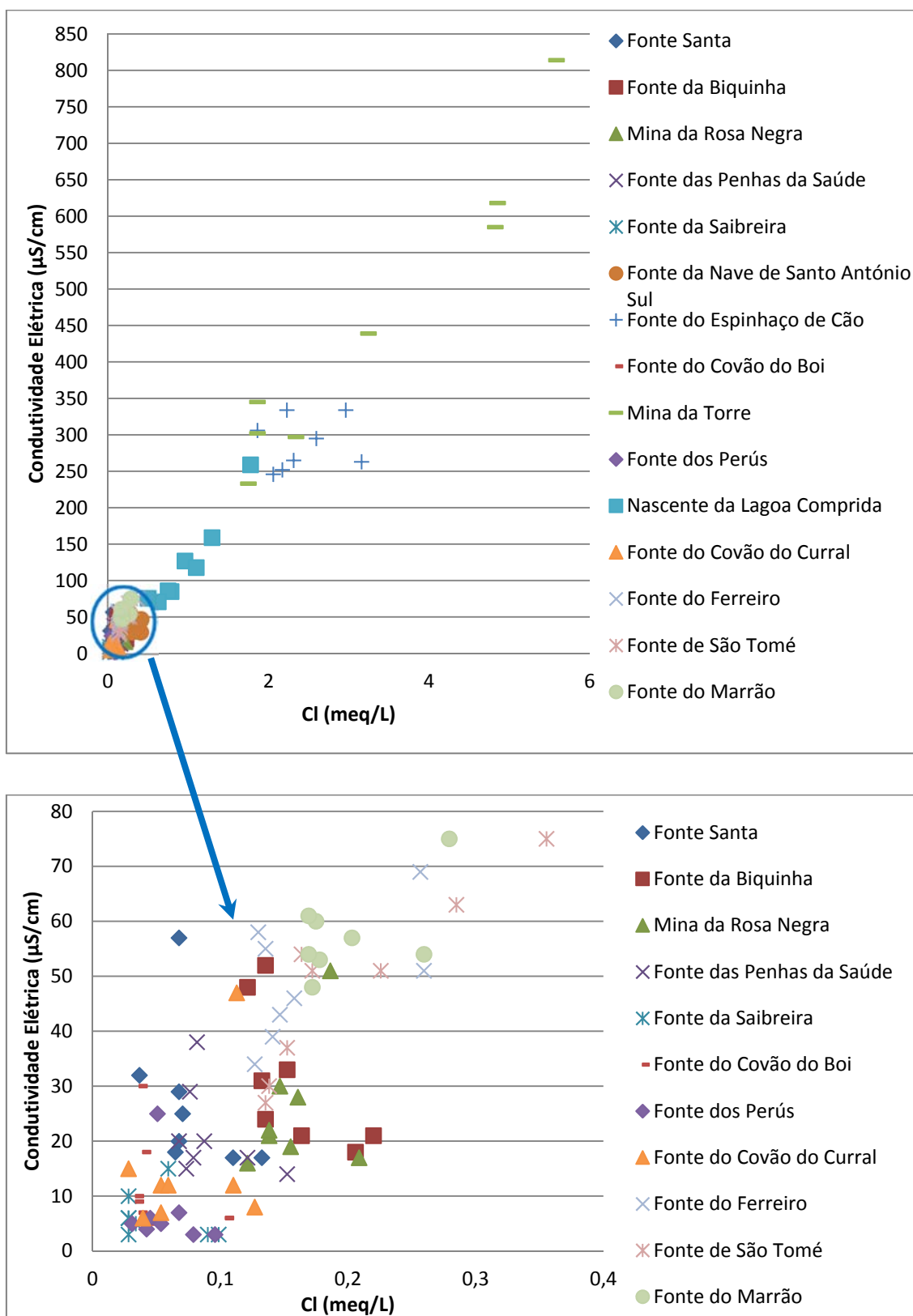


Fig. 7.3. Diagrama de dispersão representativo da concentração em cloreto *versus* condutividade elétrica de todos os pontos de água subterrânea entre Maio de 2010 e Julho de 2012 (em cima); diagrama de dispersão representativo da concentração em cloreto *versus* condutividade elétrica dos pontos de água subterrânea não contaminados entre Maio de 2010 e Julho de 2012 (em baixo).

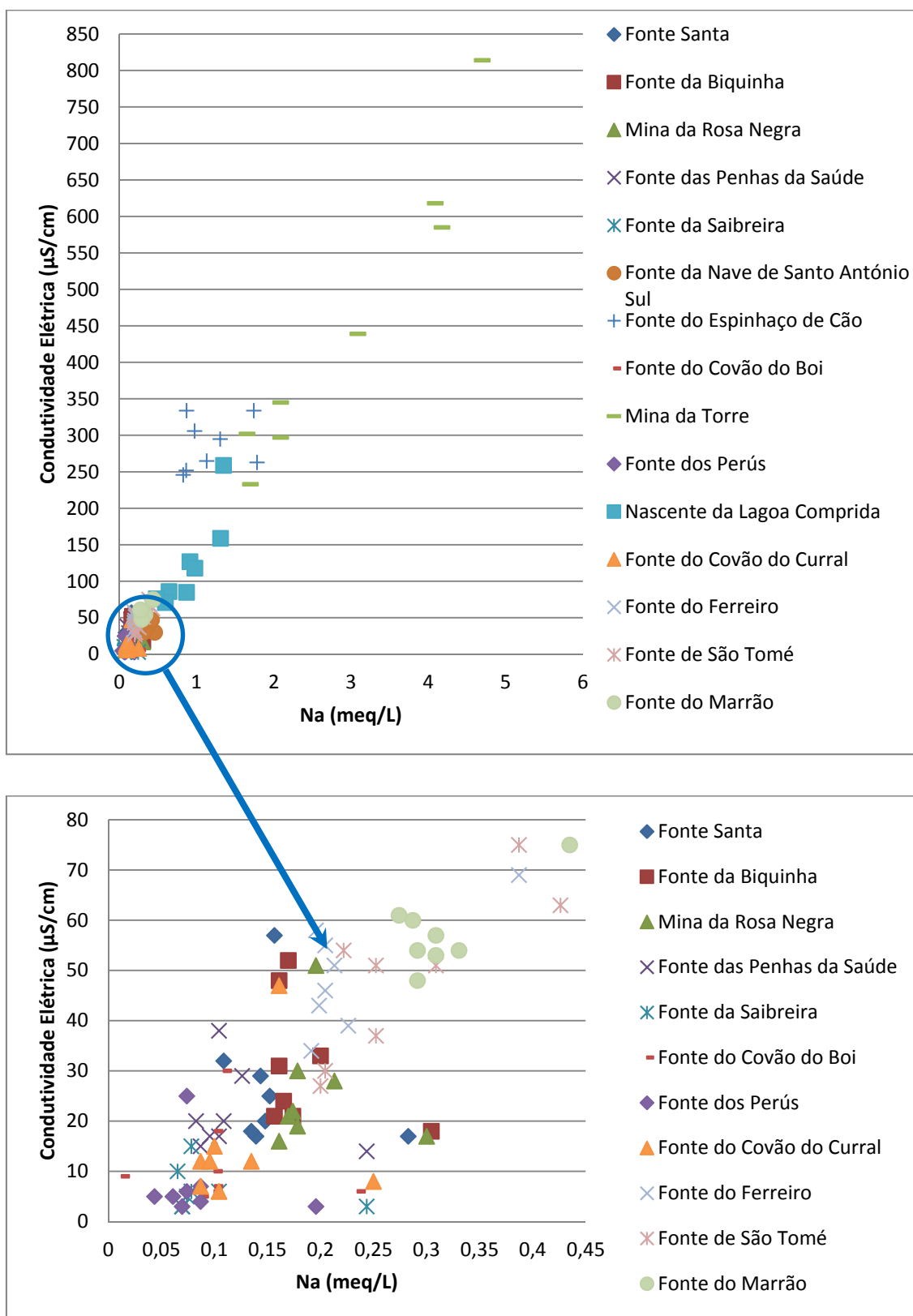


Fig. 7.4. Diagrama de dispersão representativo da concentração em sódio *versus* condutividade elétrica de todos os pontos de água subterrânea entre Maio de 2010 e Julho de 2012 (em cima); diagrama de dispersão representativo da concentração em sódio *versus* condutividade elétrica dos pontos de água subterrânea não contaminados entre Maio de 2010 e Julho de 2012 (em baixo).

A contaminação das águas subterrâneas por cloreto de sódio proveniente da limpeza das rodovias é, igualmente, evidenciada pela diferença entre os teores médios de sódio e cloreto registados para nas campanhas de Inverno e de Verão.

Observando o quadro 7.5, verifica-se que as nascentes contaminadas (Fonte da Nave de Santo António Sul e Fonte do Espinhaço de Cão) apresentam teores de sódio e cloreto bastante superiores aos das nascentes não contaminadas mais próximas, Fonte da Saibreira e Fonte do Covão do Boi, respetivamente.

Quadro 7.5. Teores médios de verão e inverno de sódio e cloreto para pontos de água potencialmente contaminados e não contaminadas.

Ponto de amostragem	Média de Verão da Concentração em Sódio (mg/L)	Média de Inverno da Concentração em Sódio (mg/L)	Média de Verão da Concentração em Cloreto (mg/L)	Média de Inverno da Concentração em Cloreto (mg/L)
F. da Saibreira *	1,9	2,6	1,1	2,2
F. Nave de Stº. António Sul **	7,4	8,6	10,3	12,3
F. do Covão do Boi *	2,5	3,0	1,3	2,6
F. do Espinhaço de Cão **	22,2	32,4	80,3	91,3
Mina da Torre **	92,3	43,3	164,0	69,3
N. da Lagoa Comprida **	25,1	14,9	45,5	23,5

(*) Ponto de água situado a montante da estrada; (**) Ponto de água situado a montante da estrada.

Para além da localização relativa à estrada (a jusante ou a montante), também a distância à mesma e o sentido do fluxo subterrâneo, inferido através do sentido do declive topográfico, influenciam a composição das águas subterrâneas, especialmente

no que respeita às concentrações de cloreto e sódio (ver quadro 7.5). As figuras 7.5., 7.6., 7.7. e 7.8. traduzem espacialmente e temporalmente essa relação.

As fontes da Saibreira e a da Nave de Santo António Sul, distam entre si cerca de 100 m, tal como se observa na figura 7.5. Analisando os diagramas de Stiff de cada uma das nascentes (fig. 7.5) verifica-se que a nascente localizada a jusante da estrada apresenta uma mineralização bastante superior, principalmente no que respeita ao cloreto e ao sódio (ver, também, o quadro 7.5). Tal como se referiu anteriormente, observa-se maior mineralização na Fonte da Nave de Santo António Sul no período de Inverno do que no de Verão. Esse facto, associado também ao sentido do declive, faz supor a existência de uma pluma de contaminação provocada pela utilização de sais na limpeza da rodovia situada entre os dois pontos de água. A água contaminada circula até ao local da emergência através do aquífero livre e, provavelmente, através de fluxo hipodérmico. Neste contexto, é de supor que o tempo de circulação seja relativamente curto.

A fonte do Espinhaço de Cão situa-se na base de uma escarpa, localizada numa vertente com elevado declive, a cerca de 100 m a jusante da estrada (fig. 7.6). Tal como no caso anterior, a água contendo sais de limpeza de neve acaba por contaminar o aquífero local. Dado o declive acentuado, é de esperar que o tempo de circulação seja curto e que o contributo do fluxo hipodérmico seja importante.



Fig. 7.5. Localização relativa da Fonte da Saibreira e da Fonte da Nave de Santo António Sul. (Imagem de satélite de 6/06/2012; extraída do sistema Google Earth).

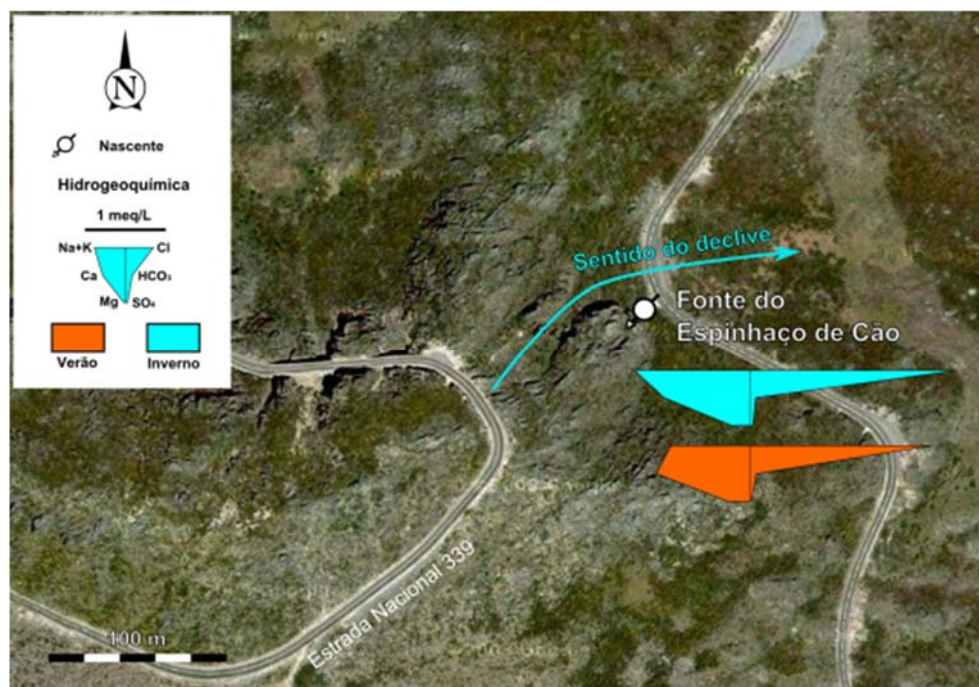


Fig. 7.6. Localização relativa da Fonte do Espinhaço de Cão. (Imagem de satélite de 6/06/2012; extraída do sistema Google Earth).

A Mina da Torre situa-se numa área planáltica cuja altitude máxima é de 1993 m, no vértice geodésico da Torre (fig. 7.7). Os sais de limpeza de neve e gelo são aplicados nas rodovias circundantes do referido vértice geodésico, assim como nos parques de estacionamento aí existentes. O local onde as operações de limpeza são mais frequentes é uma rotunda que dista cerca de 250 m deste ponto de água (fig. 7.7). Trata-se de um contexto hidrogeológico mais complexo do que nos casos anteriores devido à maior dispersão espacial da aplicação de sais e às maiores distâncias e menores declives envolvidos.

Contrariamente ao que seria de esperar, os diagramas de Stiff da figura 7.7 e o quadro 7.5 mostram a ocorrência maior mineralização no período de Verão do que no de Inverno. Esta situação, aparentemente paradoxal, pode ser explicada através de um maior tempo de circulação entre a fonte da contaminação e o ponto de água, devido quer à maior distância envolvida quer ao relevo suave, que estará associado a um menor gradiente hidráulico do que nos casos anteriormente descritos.

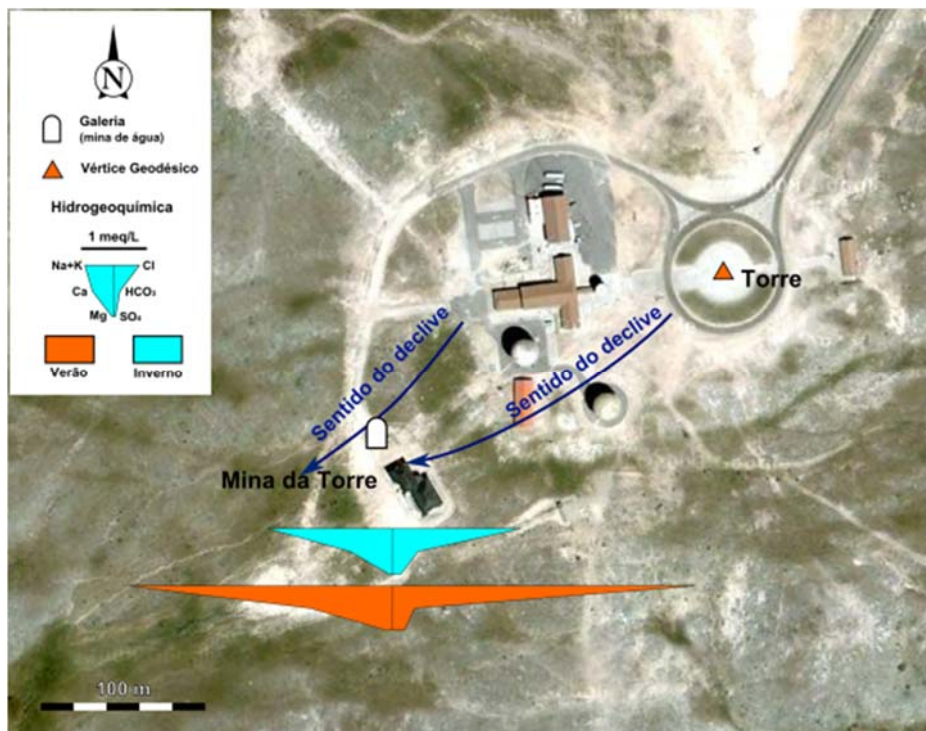


Fig. 7.7. Localização da Mina da Torre. (Imagem de satélite de 6/06/2012; extraída do sistema Google Earth).

A Nascente da Lagoa Comprida situa-se a cerca de 40 m a jusante da Estrada Nacional 339 a qual possui um declive algo acentuado para nordeste (fig. 7.8). O escoamento superficial faz-se paralelamente à estrada, a montante, e obliquamente a jusante, dada a morfologia peculiar da área. Uma vez que constitui uma estrada fundamental na região, a sua transitabilidade deve ser assegurada durante todo o ano, sendo por isso necessário recorrer a saís para a manter limpa de neve e gelo. Tal como se verifica na Mina da Torre, também os diagramas de Stiff desta nascente, demonstram que há um aumento de mineralização das águas no período de Verão (fig. 7.8). Este aumento poderá ser explicado pela relação entre o relevo e o traçado da estrada, que originará uma circulação subterrânea mais complexa de acordo com a qual o maior volume de água contaminada atinge a nascente durante o Verão.



Fig. 7.8. Localização relativa da Nascente da Lagoa Comprida. (Imagem de satélite de 25/06/2012; extraída do sistema Google Earth).

A figura 7.9 representa o modelo conceptual do processo de contaminação das águas subterrâneas pelos sais utilizados na limpeza de neve e gelo nas estradas. A aplicação destes sais pelos veículos limpa-neves (fig. 7.10) baixa o ponto de fusão, promovendo o degelo do manto de neve que escorre para as faixas adjacentes às bermas, onde ocorre a infiltração da água contaminada. Uma vez que o piso da estrada é, praticamente, impermeável, supõe-se que a infiltração tenha lugar, maioritariamente, nas bermas e não através do pavimento rodoviário.

A água contaminada entra assim na zona não saturada, a montante e a jusante da via, entrando no aquífero livre, dando origem a uma pluma de contaminação, com fluxo subterrâneo para jusante. Por fim, parte da água contaminada circula até à superfície emergindo em nascentes ou no leito de linhas de água, enquanto que outra parte irá chegar a zonas mais profundas do sistema aquífero. É, igualmente, de esperar que, à medida que a água contaminada se afasta da origem da contaminação, a concentração de cloreto de sódio e cloreto de cálcio diminua por diluição.

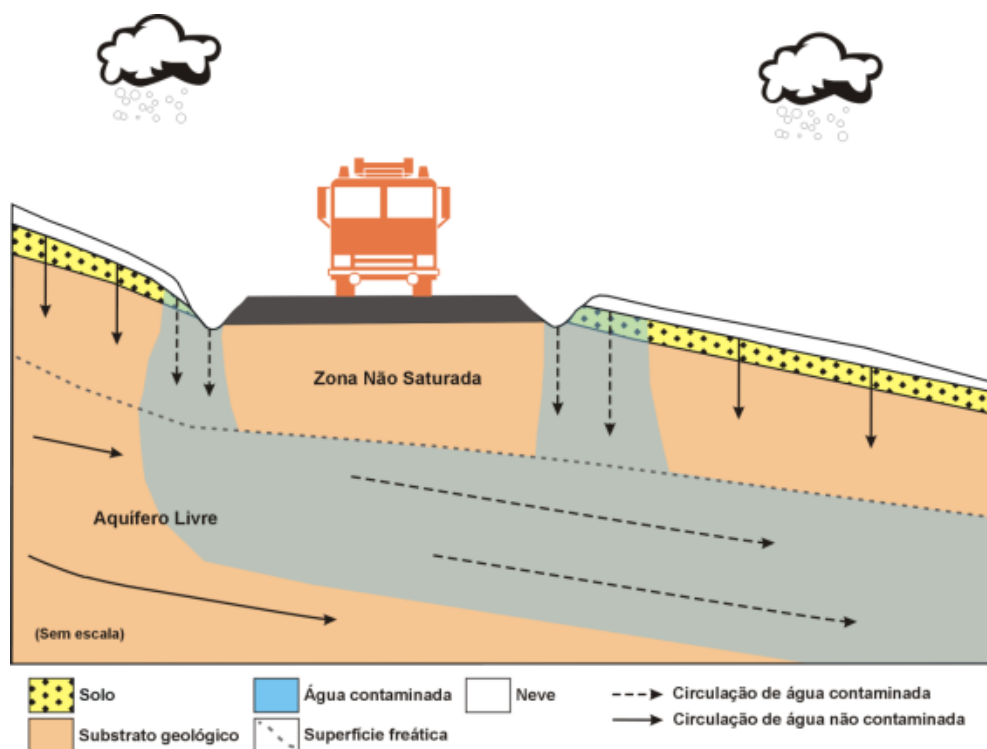


Fig. 7.9. Modelo conceptual do processo de contaminação da água subterrânea por substâncias de limpeza da neve em estradas na Serra da Estrela (adaptado de Carvalho *et al.*, 2012).



Fig. 7.10. Veículos de limpeza de neve utilizados na Serra da Estrela (retirado de Carvalho *et al.*, 2012).

Conforme foi referido anteriormente, em consequência dos fogos florestais, as espécies catiónicas cálcio, magnésio, potássio e por vezes, também, o sódio, tendem a aumentar a sua concentração nas águas subterrâneas (LNEC, 2009).

Em Agosto de 2010, teve lugar, no Parque Natural da Serra da Estrela, um fogo florestal que devastou uma ampla área, incluindo o Covão do Curral. Os resultados analíticos das campanhas de amostragem de águas subterrâneas decorridas entre Maio de 2010 e Julho de 2012, para este ponto de água, permitiram apresentar os teores dos catiões sódio, potássio, cálcio e magnésio do quadro 7.6.

Conforme se pode verificar neste quadro, com exceção do catião sódio, todos os outros apresentam um aumento de concentração no ano após a ocorrência do fogo florestal tendendo este aumento a diluir-se ao longo do tempo, como seria de esperar de acordo com as conclusões obtidas por LNEC (2009). No entanto, o estudo deste tema deverá ser aprofundado.

Quadro 7.6. Efeito hidroquímico do fogo florestal de agosto de 2010 observado na Fonte do Covão do Curral.

Catiões	Teor antes do fogo (¹)	Teor médio durante o ano a seguir ao fogo (²)	Teor passado um ano sobre a data do fogo (³)
Sódio	5,8	2,7	2,3
Potássio	0,3	0,7	0,4
Cálcio	0,9	1,8	0,9
Magnésio	0,2	0,5	0,2

Nota: unidades em mg/L. (¹) Maio de 2010; (²) Setembro de 2010 a Setembro de 2011; (³) Dezembro de 2011 a Julho de 2012

7.3. Hidrogeofísica ambiental

7.3.1. Introdução

A utilização de métodos geofísicos em estudos hidrogeológicos tem vindo a aumentar dado que estes permitem, de forma económica, rápida e pouco invasiva, obter modelos de distribuição espacial das propriedades físicas das regiões (ex. Butler, 2005). Além disso, por vezes, os modelos geofísicos permitem obter informações que complementam os modelos hidrogeológicos (Vereecken *et al.*, 2006).

A Geofísica é o ramo do conhecimento que trata da aplicação dos princípios da Física ao estudo da Terra (ex. Parasnis, 1972; Kearey *et al.*, 2002). A investigação geofísica do interior da Terra envolve a realização de medições, na superfície terrestre ou perto desta, que são influenciadas pela distribuição interna das suas propriedades físicas. A análise dessas medições pode revelar a forma como as propriedades físicas do interior da Terra variam vertical e horizontalmente (Kearey *et al.*, 2002).

A aplicação de métodos geofísicos a estudos hidrogeológicos surgiu como resposta à necessidade de caracterizar e monitorizar o meio subterrâneo de forma não evasiva, surgindo com ela a disciplina hidrogeofísica (Giroux & Chouteau, 2008). Este ramo do conhecimento tem sido utilizado sobretudo na melhoria da resolução espacial admissível pela inversão de dados geofísicos e pela sua relação com a escala de variação dos parâmetros físicos subjacentes (Hubbard *et al.*, 1999; Day-Lewis *et al.*, 2005), pela sensibilidade dos resultados das variações das propriedades físicas subterrâneas (Furman *et al.*, 2004; Chang *et al.*, 2006) e pela integração de medições geofísicas e hidrogeológicas (Tronicke & Holliger, 2005).

Os aquíferos são fundamentais para o abastecimento de água destinada às atividades humanas. Contudo, estes reservatórios estão expostos a diversos tipos de contaminantes. Dado que o fluxo e o transporte de contaminantes depende das propriedades hidrogeológicas do meio de circulação (Giroux & Chouteau, 2008), a utilização de métodos geofísicos no estudo das mesmas constitui um objeto de estudo da hidrogeofísica ambiental.

O estudo hidrogeofísico do SSTC teve como principal propósito avaliar a circulação de água contaminada com sais de limpeza da neve e gelo das estradas. Para tal, foram realizados estudos através do método da resistividade eléctrica em três locais: nas vertentes que, a oriente e ocidente, bordejam a Nave de Santo António e nas imediações da Fonte dos Perú (fig. 7.11).

As tomografias eléctricas obtidas (fig. 7.13, 7.14 e 7.16) refletem contrastes de resistividade eléctrica resultantes, simultaneamente, de diferentes materiais geológicos e do grau de contaminação da água que neles circulam.

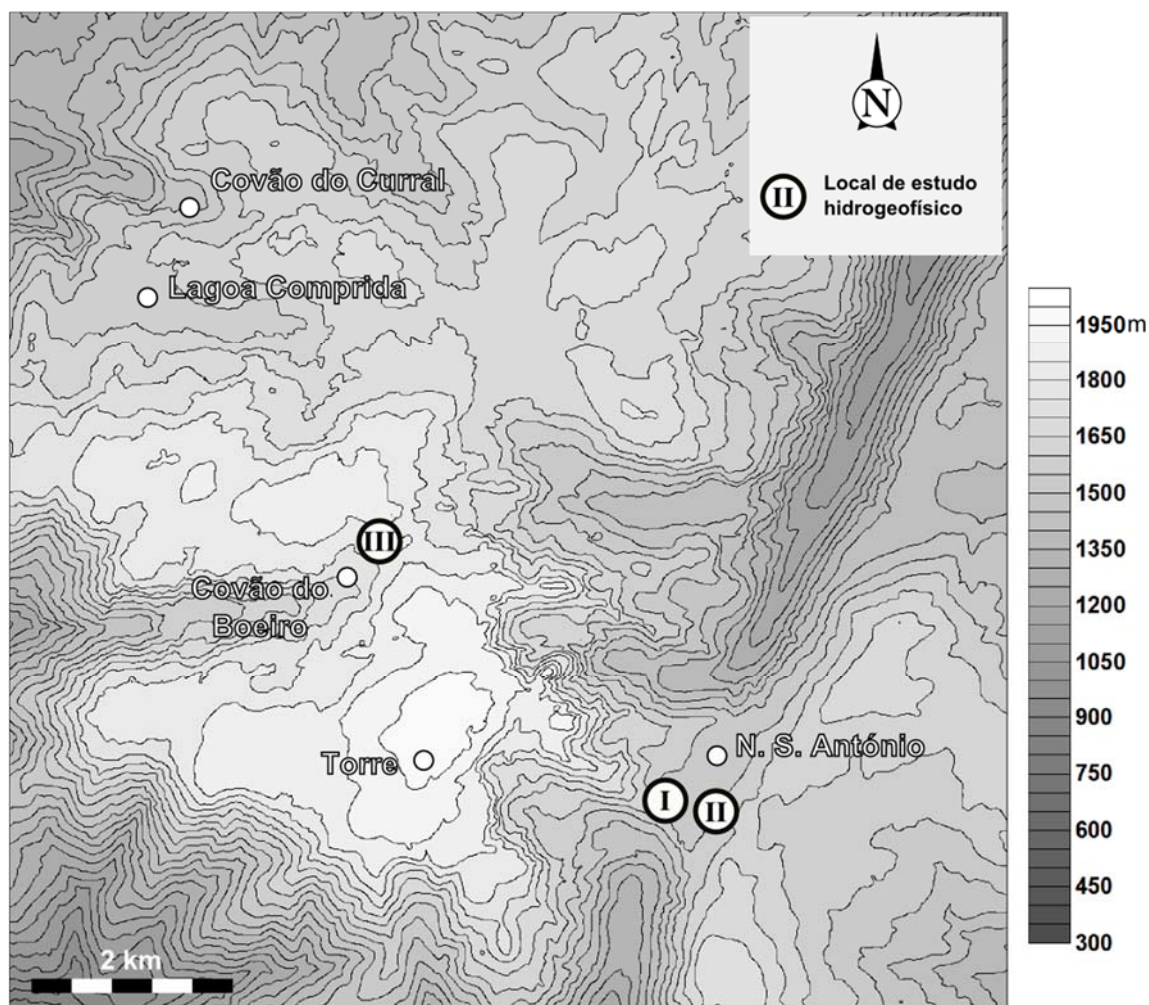


Fig. 7.11. Locais dos estudos hidrogeofísicos: vertente ocidental da Nave de Santo António (I); vertente oriental da Nave de Santo António (II); Fonte dos Perús (III).

7.3.2. Hidrogeofísica da Serra da Estrela

Os estudos hidrogeofísicos foram realizados durante os meses de Maio e Junho de 2011, nos três locais anteriormente indicados (fig. 7.11).

No presente estudo foi utilizado o aparelho de marca Iris Instruments, modelo Syscal R1 Plus, tendo sido utilizada a de disposição dos elétrodos de Wenner (ver descrição no capítulo 2). Os dados recolhidos foram tratados com o programa

RES2DINV, o qual utiliza uma inversão com base no método dos mínimos quadrados para criar tomografias verticais, ou seja, modelos bidimensionais verticais, a partir dos valores de resistividade aparente medidos (Loke & Barker, 1996).

No total, foram realizados 11 perfis de resistividade eléctrica (fig. 7.13, 7.14 e 7.16):

- três perfis de resistividade eléctrica foram dispostos na vertente oriental da Nave de Santo António (todos a jusante da estrada, entre a Fonte da Saibreira e a Fonte da Nave de Santo António Sul);
- quatro perfis de resistividade eléctrica foram dispostos na vertente ocidental da Nave de Santo António (três a jusante da estrada e um a montante da mesma);
- junto da Fonte dos Perús foram dispostos dois perfis a montante e dois a jusante da estrada.

Com base nas observações de campo levadas a cabo na vertente ocidental da Nave de Santo António, nos resultados de Espinha Marques (2007) e Carreira *et al.* (2011) e nos perfis apresentados nas figuras 7.12 e 7.13, é possível inferir que, no volume correspondente aos perfis 1 a 3, está presente uma camada superficial de granulometria mais grosseira, cuja espessura pode atingir cerca de 10 m (ver extremo SE do perfil 1), com uma elevada percentagem de blocos erráticos. A esta camada subjaz uma outra de granulometria mais fina, provavelmente, de tendência arenosa. Por seu lado, no local do perfil 4, observou-se, no terreno, que a referida camada grosseira superficial tem, em regra, menos de 5 m de espessura, tal como se observa no perfil 4 e que a esta subjaz rocha granítica.

Por outro lado, a análise conjunta dos perfis 1 a 4 permite verificar que, com exceção da zona correspondente à camada superficial grosseira já referida, os valores mais baixos de resistividade eléctrica se localizam junto da estrada. Com efeito, à medida que a distância à estrada aumenta, para jusante, a resistividade eléctrica aumenta igualmente.

Este comportamento da resistividade pode ser explicado pela presença de uma pluma de contaminação da água subterrânea com origem nas bermas da estrada, de acordo com o modelo conceptual do processo de contaminação da água subterrânea por substâncias de limpeza da neve apresentado na figura 7.9. A água contaminada terá tendência a circular para zonas mais profundas e a misturar-se com água não contaminada a jusante da estrada.

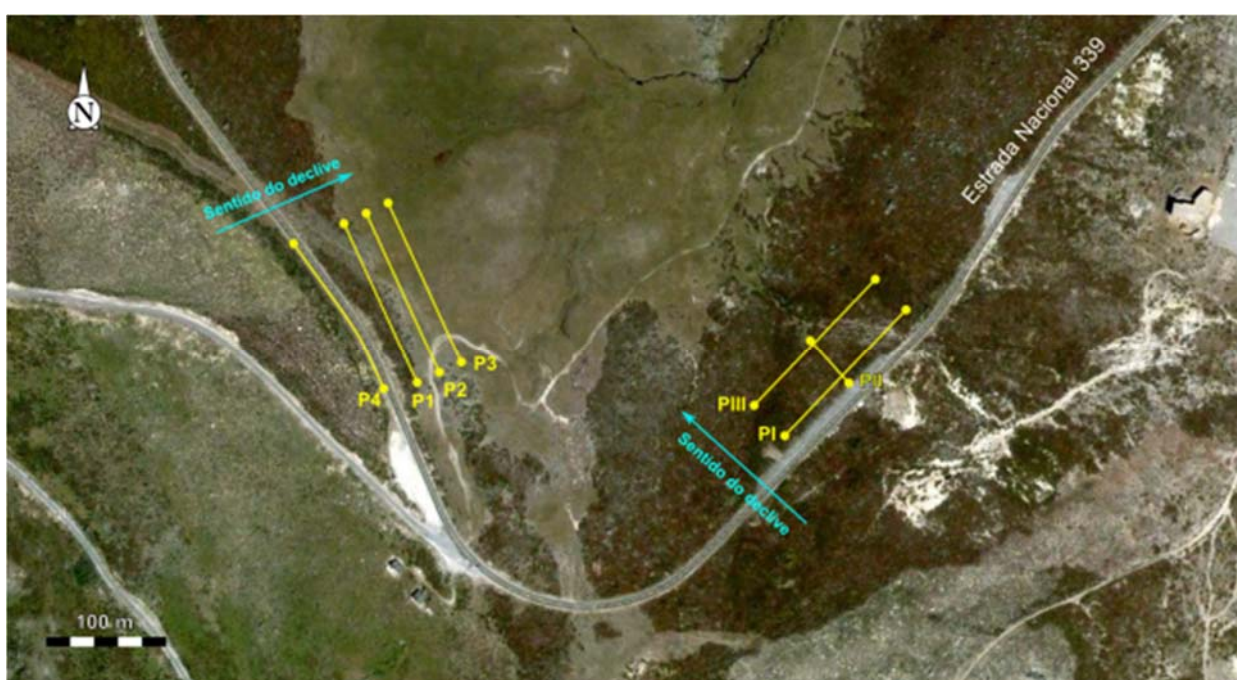


Fig. 7.12. Localização dos perfis de resistividade eléctrica traçados na Nave de Santo António.

Na vertente oriental da Nave de Santo António (fig. 7.12 e 7.14) a camada superficial grosseira observada na vertente ocidental está ausente, existindo, antes, um depósito glaciário (o qual inclui blocos erráticos) em regra, com menos de 1 m de espessura, sobre rocha granítica.

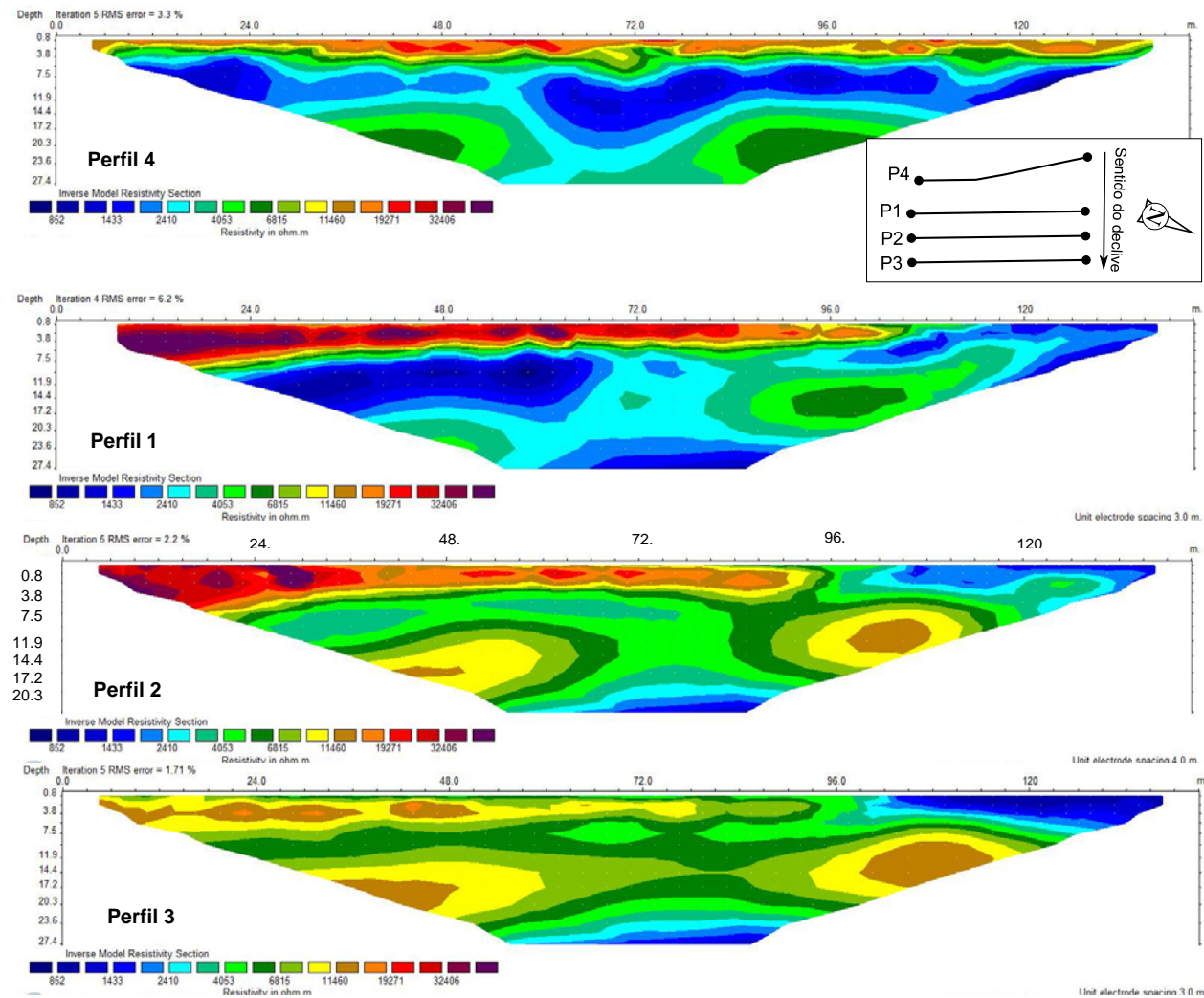


Fig. 7.13. Perfis de resistividade elétrica na vertente ocidental da Nave de Santo António.

Neste caso, observa-se o aumento dos valores da resistividade elétrica para jusante da estrada, na zona mais superficial dos perfis I e III (fig. 7.14). Pelo contrário, na zona mais profunda dos perfis, a resistividade tende a diminuir com o aumento da distância à estrada. Este comportamento pode ser explicado pela circulação mais superficial da água contaminada junto da estrada (perfil I) e mais profunda na zona mais afastada. O perfil II, apesar de atingir, apenas, cerca de 9 m de profundidade, parece confirmar esta tendência. Estes resultados são concordantes com as medições da condutividade eléctrica da água nas fontes da Saibreira e da Nave de Santo António Sul (ver fig. 7.5).

Nas imediações da fonte dos Perús não existem depósitos glaciários. A rocha granítica aflora em diversos locais e encontra-se pouco meteorizada. A montante da estrada, o granito encontra-se coberto por uma película de sedimentos, normalmente, com menos de 25 cm de espessura. A jusante da estrada, a cobertura sedimentar chega a atingir 1 m de espessura. Os perfis de resistividade elétrica têm 47 m de comprimento e alcançam até cerca de 9 m de profundidade.

Existem claras diferenças entre os perfis de resistividade elétrica efetuados a montante (perfis 7 e 8) e a jusante (perfis 5 e 6) da estrada (ver fig. 7.15 e 7.16). Assim, os perfis situados a montante apresentam valores de resistividade mais elevados. Os perfis situados a jusante da estrada apresentam valores claramente inferiores, em resultado da circulação de água contaminada com sais de limpeza de neve.

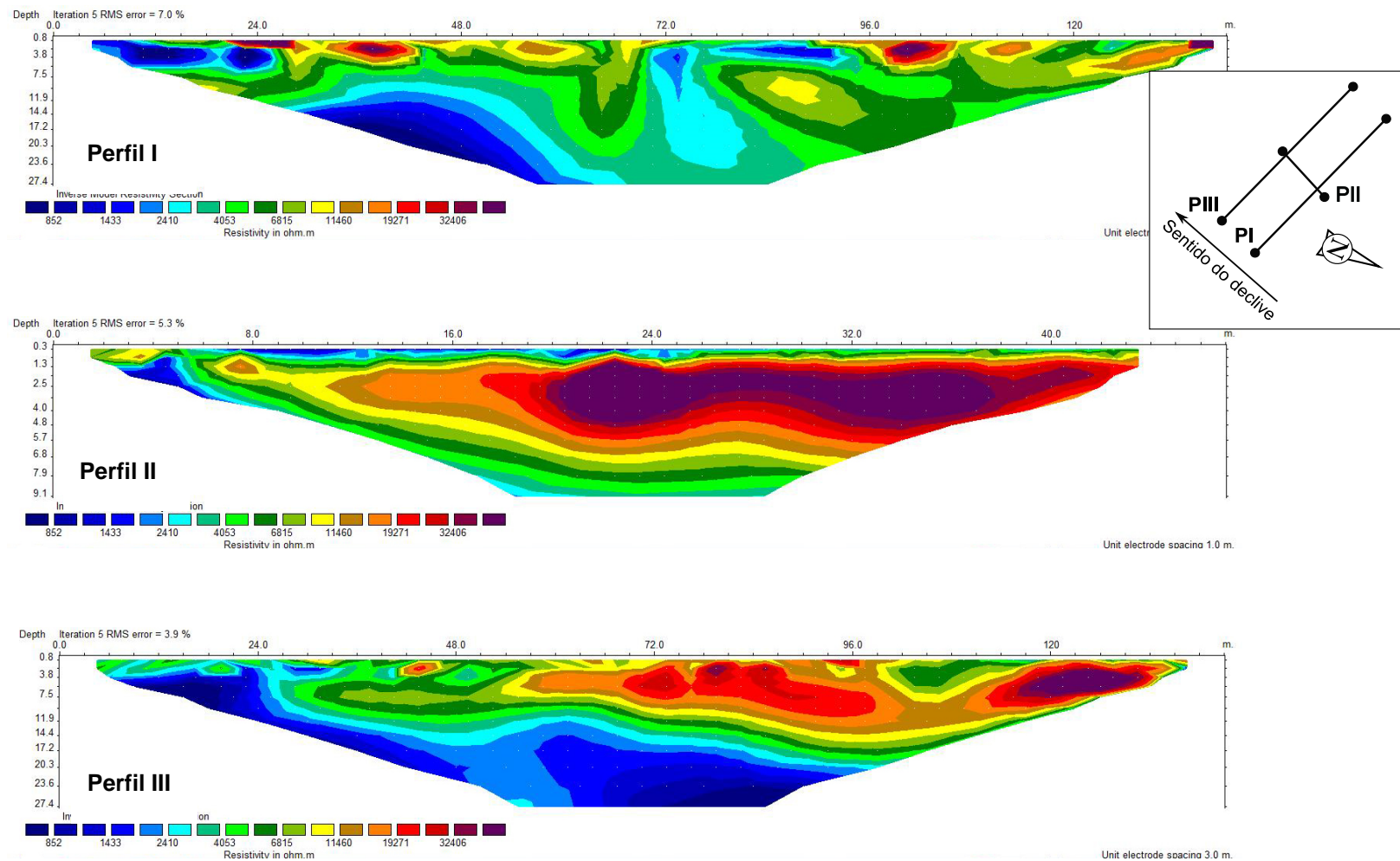


Fig. 7.14. Perfis de resistividade elétrica na vertente oriental da Nave de Santo António.



Fig. 7.15. Localização dos perfis de resistividade elétrica nas imediações da Fonte dos Perús.

Em todos os casos, os resultados hidrogeofísicos corroboram o modelo conceptual de contaminação da água subterrânea anteriormente proposto e os resultados hidrogeoquímicos: a água contaminada infiltra-se nos solos adjacentes às bermas e, depois, circula em meio subterrâneo para jusante das rodovias refletindo-se na hidroquímica dos pontos de água aí situados.

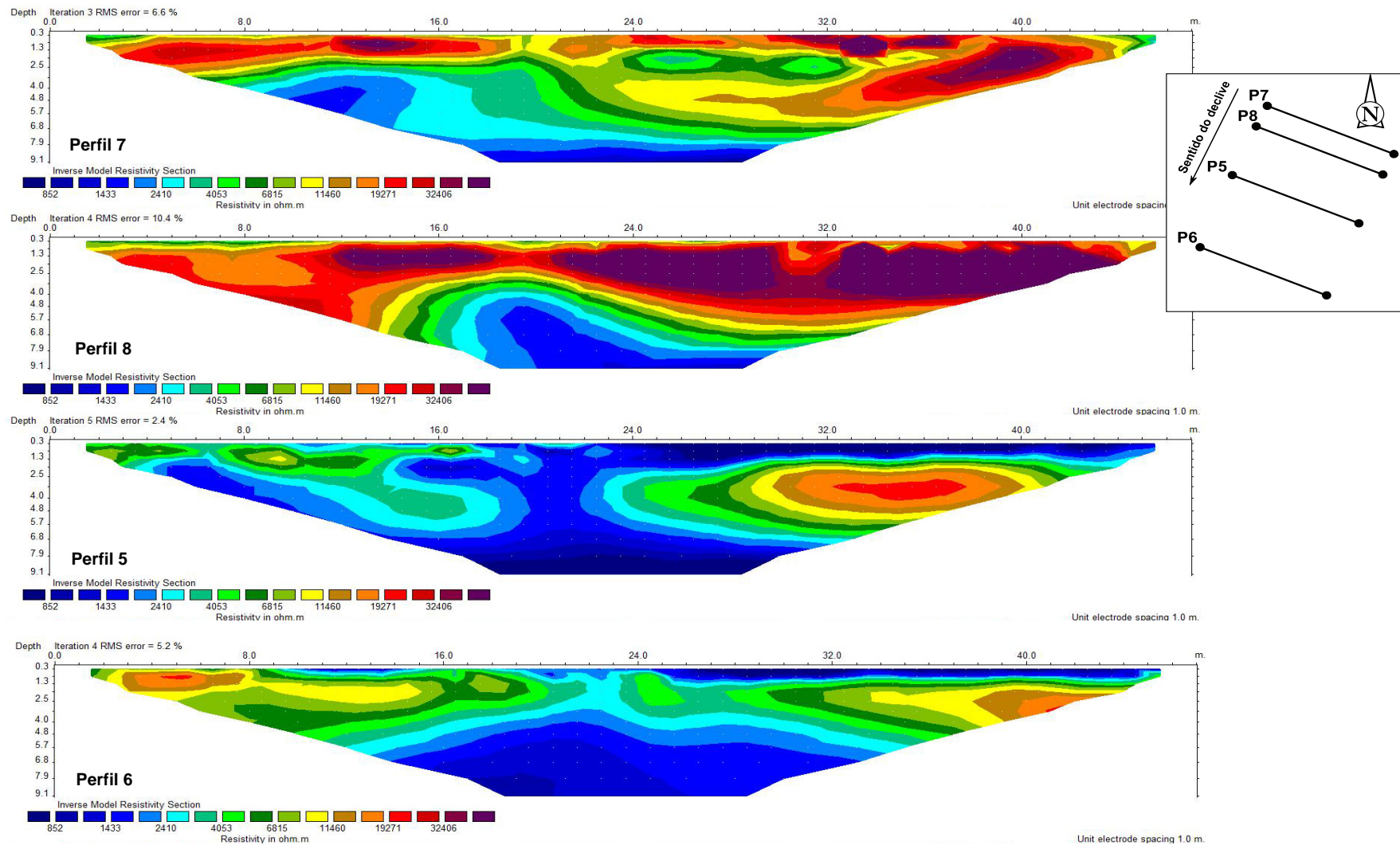


Fig. 7.16. Perfis de resistividade elétrica nas imediações da Fonte dos Perús.

7.4. Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos

7.4.1. Introdução

Uma das formas de avaliação da contaminação das águas é através de marcadores orgânicos geoquímicos como é o caso dos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs). Estes, devido às suas características de natureza específica, resistência aos processos de degradação e estabilidade química, sofrem pouca ou nenhuma alteração ao longo do tempo sendo considerados contaminantes orgânicos persistentes. A avaliação desses marcadores possibilita a determinação das origens e intensidade das atividades antrópicas regionais, dado que estão diretamente relacionados a fontes de contaminação conhecidas (LNEC, 2009)

Os HAPs constituem uma família de compostos químicos orgânicos semi-voláteis formados por dois ou mais anéis aromáticos condensados, ligados de forma linear, angular ou agrupados, contendo na sua estrutura somente carbono e hidrogénio (Lopes & Andrade, 1996).

Os HAPs são moléculas relativamente neutras cujo comportamento, transporte e destino dependem das suas características físico-químicas e bioquímicas. A solubilidade em água é geralmente baixa, com exceção do naftaleno que é relativamente solúvel, o que condiciona o seu transporte no meio ambiente e a adsorção às partículas do solo (Henner *et al.*, 1997). Na maioria dos casos, a solubilidade diminui com o aumento do número de anéis e da massa molecular do composto. Apresentam pontos de fusão e ebulição elevados e possuem baixa pressão de vapor (ex. Hawthorne *et al.*, 1994; Bemgård *et al.*, 1994; Niederfellner *et al.*, 1997).

Habitualmente ocorrem sob a forma de misturas na natureza (ATDSR, 1995), cuja composição e complexidade depende das fontes emissoras (Pereira Netto *et al.*,

2000). Os HAPs podem ter origens naturais ou antrópicas, contudo, a contribuição das fontes naturais é muito mais reduzida quando comparada com a quantidade de HAPs emitidos por fontes antrópicas (ex. EC, 2002; Bettin & Franco, 2005; IPCS, 1998).

Estas estruturas formam-se sempre que substâncias orgânicas são expostas a temperaturas elevadas, ou seja por pirólise, em que é libertada energia, sendo os produtos aromáticos formados mais estáveis do que os que lhe dão origem (Blumer, 1988). São fontes naturais destes compostos, por exemplo, as erupções vulcânicas, a biossíntese realizadas por determinadas plantas, bactérias e algas e fogos espontâneos (ex. ATSDR, 1995; Caruso & Alaburda, 2008). Como fontes antrópicas destaca-se a combustão incompleta de combustíveis fósseis, matéria orgânica vegetal, resíduos urbanos e industriais entre outras substâncias, resíduos mineiros, depósitos de resíduos perigos, máquinas de combustão interna e geradores de calor e energia, entre outros (ATSDR, 1995; Harvey, 1998; Fetzer, 2000; Ribeiro *et al.*, 2012).

Sendo que as fontes naturais de HAPs sempre existiram, estes compostos têm estado presentes nos ciclos biogeoquímicos em concentrações residuais naturais mais ou menos constantes, dado o balanço natural entre a sua formação e degradação (ex. Furuta & Otsuki, 1983; Henner *et al.*, 1997). Contudo, a partir do início do século XX, com a revolução industrial, a crescente utilização de combustíveis fósseis e o consequente aumento na produção de HAPs, fez com que o equilíbrio natural até aí existente fosse perturbado, dada a velocidade de deposição ter excedido a velocidade de degradação levando ao aumento de acumulação nos sistemas naturais (Henner *et al.*, 1997).

A compreensão do movimento dos HAPs é um fator determinante para caracterizar as suas concentrações no ambiente, sendo a avaliação da sua presença nos diferentes meios essencial para a compreensão e interpretação da toxicidade destes contaminantes, permitindo avaliar o risco ecológico que representam

(Klaassen,1996). Na atmosfera podem estar presentes em gases ou associados a pequenas partículas sólidas. Quando presentes nos solos, estes compostos tendem a fixar-se, podendo, mesmo, contaminar as águas subterrâneas.

Uma vez que os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos são pouco solúveis em água, a sua entrada no Ciclo Hidrológico faz-se sobretudo através da deposição de partículas atmosféricas nas águas superficiais, da descarga de efluentes industriais e urbanos e através de fenómenos de combustão. Também a precipitação, capaz de remover estes compostos em suspensão na atmosfera, pode ser responsável pela sua entrada nos sistemas aquíferos. Quando presentes em massas de água superficiais, como rios e lagos, tendem a depositar-se no seu leito (ATSDR, 1995). A contaminação das águas subterrâneas por HAPs ocorre na sequência da lixiviação dos solos e sedimentos contaminados, nomeadamente quando os HAPs são acompanhados de solventes orgânicos móveis (Bedient *et al.*, 1984; Slooff *et al.*, 1989).

7.4.2. Toxicologia

Os HAPs, bem como alguns dos seus derivados, têm sido referenciados como sendo potencialmente carcinogénicos e mutagénicos, capazes de causar efeitos toxicológicos no crescimento, metabolismo e reprodução de toda a biota (microrganismos, plantas terrestres, biota aquítica, anfíbios, répteis, aves e mamíferos), bem como formação de tumores, toxicidade aguda, bioacumulação e outros danos em diversas espécies de animais (EC, 2002; IARC, 1983; Pereira Neto *et al.*, 2000).

Dadas as suas propriedades físico-químicas e a sua elevada distribuição ambiental, o risco de contaminação humana por estas substâncias é significativo (Pereira Neto *et al.*, 2000). No que diz respeito aos seres humanos, a contaminação

ocorre principalmente através da contaminação ambiental e biológica (quadro 7.7), por via inalatória, dérmica ou por ingestão.

Uma das fontes de maior exposição dos seres humanos aos HAPs são os alimentos e bebidas, os quais podem ser contaminados por HAPs disseminados no ambiente (pela atmosfera, água, solos) ou durante o seu processo de preparação (Caruso & Alaburda, 2008).

Uma vez no organismo, a ação dos HAPs é ativada durante o processo metabólico, que visa a formação de compostos hidrossolúveis de forma a facilitar a sua eliminação. Contudo, esses compostos podem reagir com o DNA e originar processos de tumoração (Caruso & Alaburda, 2008; Lopes & Andrade, 1996).

Quadro 7.7. Níveis de HAPs encontrados em amostras ambientais e biológicas (LNEC, 2009).

Tipo da amostra	Concentração
Ar	1,3 a 500 ng/m ³
Solo	0,8 ng/Kg a 100 mg/Kg
Água	2,5 a 500 ng/L
Plantas	<150 µg/Kg
Alimentos	0,1 a 28 µg/Kg

Inicialmente, o aumento da atividade carcinogénica nos seres humanos foi atribuída apenas à presença do hidrocarboneto aromático policíclico benzo(a)pireno (BaP), contudo, foi comprovado posteriormente que a presença de BaP por si só seria insuficiente para justificar tal aumento, tendo sido determinado que o excesso de atividade carcinogénica se deveria à presença conjunta de vários elementos da família dos HAPs e seus derivados (Pereira Netto *et al.*, 2000).



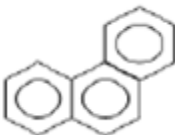

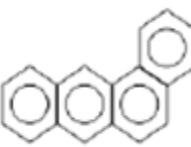
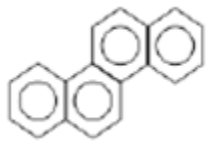

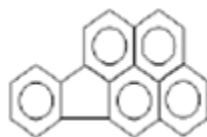

7.4.3. Legislação

Em 1997, a ATDSR (*Agency for Toxic Substances and Disease Registry*), em conjunto com a EPA (*Environmental Protection Agency*), divulgaram uma lista com as principais substâncias potencialmente tóxicas para os seres humanos, sendo essa lista conhecida por “CERCLA Priorit List”. Os elementos que nela figuram foram selecionados de acordo com três fatores: a frequência de ocorrência, a sua toxicidade e o potencial de exposição humana. A partir dessa data, a EPA passou a considerar como prioritários os 16 HAPs que constam do quadro 7.8. Na lista publicada pela ATDSR, em 2005, o grupo de HAPs, como grupo de compostos, ocupa a sétima posição, ocupando o benzo(a)pireno e o benzo(b)fluoranteno o nono e décimo lugar, respetivamente (IPCS, 1998).

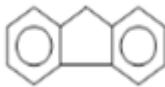


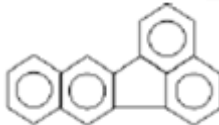
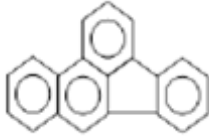
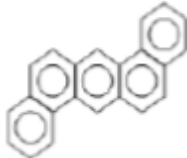

No que respeita à qualidade da água, as substâncias prioritárias, são definidas na legislação portuguesa, como “*as substâncias que representam risco significativo para o ambiente aquático ou por seu intermédio, sendo a sua identificação feita através de procedimentos de avaliação de risco legalmente previstos ou, por razões de calendário, através de avaliação de risco simplificadas*” (DL nº103/2010). Segundo o referido documento, dentro da classificação das substâncias prioritárias existem ainda as identificadas como substâncias prioritárias perigosas, as quais são substâncias que apresentam um risco acrescido em relação às demais substâncias prioritárias.

Como é possível observar no quadro 7.8, a legislação portuguesa contempla apenas 8 dos HAPs reconhecidos pela EPA como substâncias prioritárias, sendo que, desses, somente 6 são identificados como substâncias prioritárias perigosas. Contudo, os HAPs como família de compostos, são também contemplados na legislação nacional como substâncias prioritárias e identificados como substâncias prioritárias perigosas.

Quadro 7.8. Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos prioritários (segundo a EPA).

Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos prioritários	Formula química	Estrutura química	Substância prioritária (DL 103-2010)	
			Substância prioritária	Substância prioritária perigosa
Naftaleno	$C_{10}H_8$		x	
Acenaftileno	$C_{12}H_8$			
Fenantreno	$C_{14}H_{10}$			
Antraceno	$C_{14}H_{10}$		x	x
Benzo(a)antraceno	$C_{20}H_{12}$			
Criseno	$C_{18}H_{12}$			
Benzo(a)pireno	$C_{20}H_{12}$		x	x
Indeno(1,2,3-c,d)pireno	$C_{22}H_{12}$		x	x
Acenafteno	$C_{12}H_{10}$			

(continuação)

Fluoreno	$C_{13}H_{10}$			
Fluoranteno	$C_{16}H_{10}$		x	
Pireno	$C_{16}H_{10}$			
Benzo(k)fluoranteno	$C_{20}H_{12}$		x	x
Benzo(b)fluoranteno	$C_{20}H_{12}$		x	x
Dibenzo(a,h)antraceno	$C_{22}H_{14}$			
Benzo(g,h,i)perileno	$C_{22}H_{12}$		x	x

O Decreto-Lei nº306/2007 estabelece o valor paramétrico para os HAPs de 0,10 µg/L, correspondente à soma das concentrações dos compostos especificados: benzo[b]fluoranteno, benzo[k]fluoranteno, benzo[ghi]perileno e indeno[1,2,3-cd]pireno. Para o HAP benzo(a)pireno estabelece um valor de 0,010 µg/L. Por sua vez, a Portaria

nº518/2004 não estabelece um valor máximo de HAP na água potável, mas adota o padrão de 0,7 µg/L para o benzo[a]pireno, valor esse também recomendado pela OMS.

7.4.4.1. Ocorrência de HAPs como consequência de fogos florestais

Os contaminantes orgânicos, como os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, constituem uma reconhecida forma de avaliação do impacto dos fogos florestais sobre os solos e os recursos hídricos (ex. Kim *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2003; Falcón *et al.*, 2006 *in* LNEC, 2009).

Durante os fogos florestais, os HAPs são emitidos em quantidades apreciáveis pela queima de biomassa, aumentando consideravelmente a concentração destes compostos nos solos e sedimentos (ex. Jones *et al.*, 1989; Kim *et al.*, 2000; Rollin *et al.*, 2005 *in* LNEC, 2009). A produção de HAPs depende de condições meteorológicas, como a temperatura do ar, o vento e a humidade da madeira e o seu estado de maturação (Lee & Vu, 2010). Depende, ainda, da intensidade do fogo e da fase de combustão. Apesar de a emissão de HAPs estar sobretudo ligada à forma gasosa, uma quantidade significativa de HAPs mais pesados ocorre associada a partículas finas de carbono. Aquando da sua formação, durante a combustão incompleta ou pirólise de materiais com carbono e hidrogénio, os HAPs, quando emitidos para a atmosfera, são absorvidos por partículas e expostos a vários poluentes gasosos tais como radicais livres e espécies moleculares no estado excitado e excitáveis (Vasconcellos *et al.*, 1998). As partículas de cinza constituem importantes meios de transporte destes compostos através do solo para os sistemas hídricos (Low & Betley, 1988 *in*: LNEC, 2009).

Durante a ocorrência de processos de combustão de biomassa em ambiente redutor são emitidos HAPs, dos quais cerca de 80 a 90% são compostos de baixo

peso molecular (2 a 4 anéis) (Vasconcellos *et al.*, 1998; Schauer *et al.*, 2001 in LNEC 2009). De acordo com LNEC 2009, o naftaleno, bem como os seus derivados alquilados, constituem mais de 85% do total de hidrocarbonetos formados no fumo libertado pelos fogos. Os compostos com 3 anéis aromáticos constituem 11 a 39%, enquanto que os compostos com 4 anéis representam 3 a 16% dos HAPs totais. A elevada correlação entre os demais HAPs e o naftaleno, constitui um indício de que este hidrocarboneto é o precursor dos outros compostos (LNEC, 2009).

7.4.4.2. Ocorrência de HAPs em águas subterrâneas da Serra da Estrela

Em consequência dos incêndios florestais do Verão de 2010, foi realizado um estudo exploratório, com o intuito de se procurar determinar os potenciais efeitos na concentração de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos nas águas subterrâneas. Para a amostragem, foram selecionados 5 pontos de água subterrânea em locais afetados por fogos florestais em diferentes datas, tendo as campanhas de amostragem ocorrido nos meses de Abril e Setembro de 2011.

Os pontos amostrados foram a Fonte do Covão do Curral, Fonte da Jonja, Fonte de São Tomé, Nascente do Sabugueiro e Fonte do Covão do Boi. Destes, a Fonte do Covão do Curral, a Fonte de São Tomé e a Nascente do Sabugueiro situam-se na área florestal ardida em Agosto de 2010; a Fonte da Jonja sofreu o impacto dos incêndios florestais ocorridos no Verão de 2005, enquanto que em relação à Fonte do Covão do Boi não existe registo de ter ocorrido qualquer incêndio florestal no local onde se situa nem nas suas imediações.

Tomando como referência os valores dos somatórios das concentrações de HAPs de cada um dos pontos analisados (quadro 7.9), verifica-se que a Fonte do Covão do Boi apresenta concentração francamente inferior (6,2 ng/L), quando

comparada com os demais pontos de amostragem. Este fato pode ser atribuído à ausência de fogos florestais na bacia hidrogeológica associada a este ponto de água. Já quando se comparam as nascentes localizadas na região ardida no Verão de 2010 com a nascente situada na área cujo último fogo data de 2005 verifica-se que não existe uma diferença significativa na concentração total de HAPs, com exceção da Nascente do Sabugueiro. Assim, verificou-se que a concentração total destes compostos foi de 62,6 ng/L para a Fonte do Covão do Curral, 63,1 ng/L para a Fonte de S. Tomé, 32,8 ng/L para a Nascente do Sabugueiro e 64,7 ng/L para a Fonte da Jonja.

Quadro 7.9. Concentração de HAPs nas águas subterrâneas amostradas em 2011.

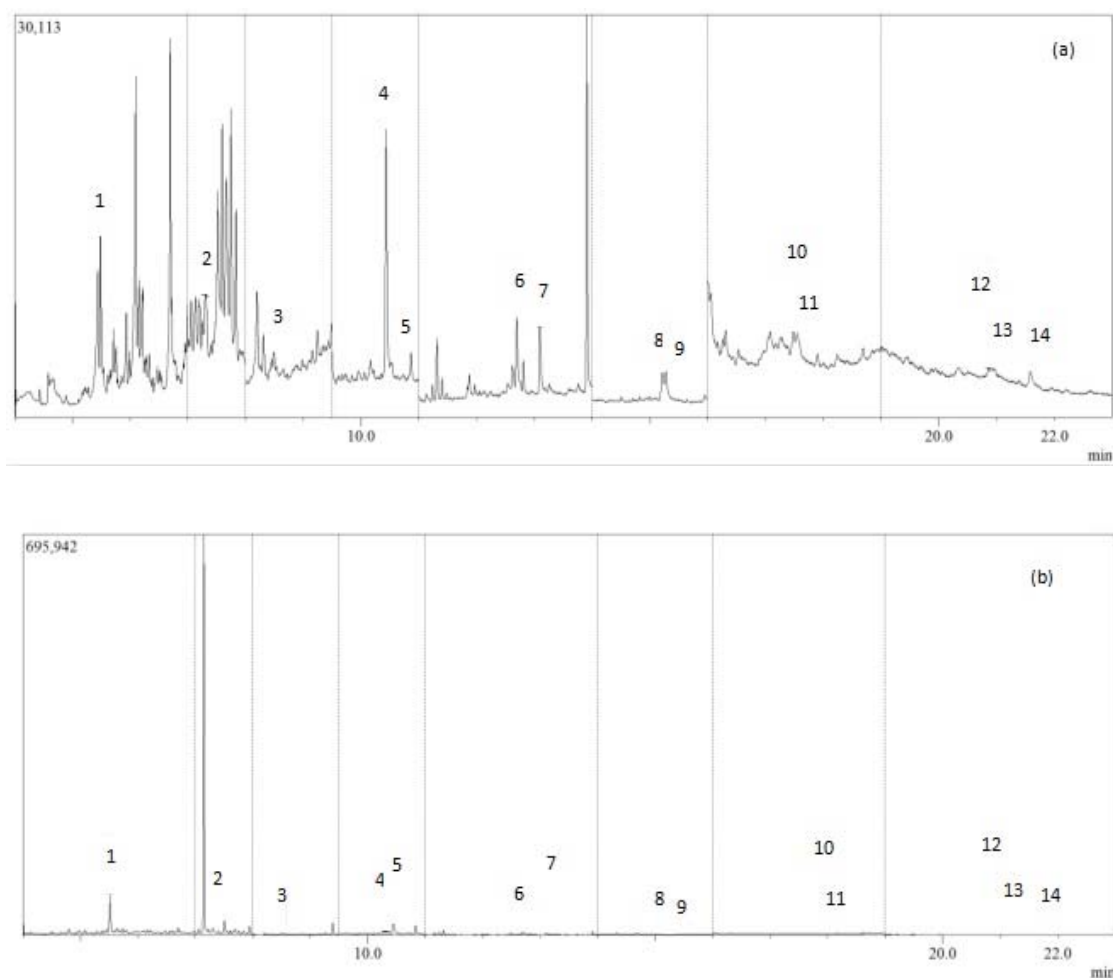
Compostos	Teor em HAPs (ng/L)				
	12 de Abril de 2011			29 de Setembro de 2011	
	Fonte Covão do Curral	Fonte da Jonja	Fonte de S. Tomé	Nascente do Sabugueiro	Fonte do Covão do Boi
Nafataleno	17,8	28,0	38,3	n.d.	n.d.
Acenaftileno	<LOD	<LOD	<LOD	<LOQ (9,6)	n.d.
Acenafteno	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Fluoreno	1,0	1,4	2,1	4,0	1,2
Fenantreno	<LOD	<LOD	<LOD	6,1	<LOD
Antraceno	<LOQ (6,9)	<LOQ (6,9)	<LOQ (6,9)	n.d.	n.d.
Fluoranteno	<LOD	<LOD	<LOD	n.d.	<LOD
Pireno	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Benzo(a)antraceno	6,2	5,7	n.d.	n.d.	5,0
Criseno	<LOQ (3,4)	<LOQ (3,4)	n.d.	n.d.	<LOD
Benzo(b)fluoranteno	6,5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Benzo(k)fluoranteno	5,7	5,7	n.d.	n.d.	n.d.
Benzo(a)pireno	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Dibenzo(a,h)antraceno	8,1	7,9	7,5	7,5	n.d.
Benzo(ghi)perileno	9,8	9,0	8,5	8,5	n.d.
Indeno(1,2,3-cd)pireno	7,5	7,1	6,6	6,6	n.d.
Somatório	62,6	64,7	63,1	32,8	6,2

n.d. – não detetado; LOQ – limite de quantificação; LOD – limite de deteção.

Analisando agora as concentrações de cada um dos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos verifica-se que o composto com maior concentração é o naftaleno com concentrações de 17,8 ng/L na Fonte do Covão do Curral (fig. 7.17. (a)) 28,0 ng/L na Fonte da Jonja e 38,3 ng/L na Fonte de S. Tomé.

As demais espécies de HAPs apresentam valores significativamente mais reduzidos. Contudo, são de realçar os compostos dibenzo(a,h)antraceno, benzo(ghi)perileno e indeno(1,2,3-cd)pireno, os quais ocorrem com concentrações médias de cerca de 7,8 ng/L, 9,0 ng/L e 7,0 ng/L respetivamente, considerando, apenas, as nascentes afetadas por fogos florestais.

O único composto que ocorre em todas as águas amostradas é o fluoreno, apresentando concentrações mínimas de 1,0 ng/L, na Fonte do Covão do Curral, e máximas de 4,0 ng/L na Nascente do Sabugueiro. Já as espécies fenantreno e benzo(b)fluoranteno ocorrem apenas na Nascente do Sabugueiro e Fonte do Covão do Curral, respetivamente, com concentrações de 6,1 ng/L e 6,5 ng/L. O HPA benzo(k)fluoranteno está presente nas amostras da Fonte do Covão do Curral e na Fonte da Jonja com concentrações de 5,7 ng/L em ambos os casos. Por fim, a espécie benzo(a)antraceno ocorre nas Fonte do Covão do Curral (6,2 ng/L), Fonte da Jonja (5,7 ng/L) e Fonte do Covão do Boi (5,0 ng/L) (fig. 7.17. (b)).



Nota: 1. Naftaleno; 2. Acenaftileno; 3. Fluoreno; 4. Fenantreno; 5. Antraceno; 6. Fluoranteno; 7. Pireno; 8. Benzo(a)antraceno; 9. Criseno; 10. Benzo(b)fluranteno; 11. Benzo(k)fluoranteno; 12. Indeno(1,2,3-cd)pireno; 13. Dibenzo(ah)antraceno; 14. Benzo(ghi)perileno.

Fig. 7.17. Cromatogramas de duas das nascentes amostradas: (a) Fonte do Covão do Curral; (b) Fonte do Covão do Boi.

Dos HAPs considerados neste estudo, os compostos: naftaleno, acenaftileno, fenantreno, antraceno, benzo(a)antraceno, criseno, acenafteno, fluoreno, fluoranteno, pireno, são compostos de baixo peso molecular, ou seja, compostos com 4 ou menos anéis aromáticos na sua estrutura; sendo os restantes HAPs: benzo(a)pireno, indeno(1,2,3-c,d)pireno, benzo(k)fluoranteno, benzo(b)fluoranteno, dibenzo(a,h)antraceno e benzo(g,h,i)perileno, compostos de alto peso molecular, com mais de 4 anéis aromáticos.

Comparando os resultados obtidos no de SSTC, para as campanhas de amostragem de 2011, com o estudo de LNEC (2009), verifica-se que, no setor em estudo, há uma maior ocorrência de compostos de alto peso molecular. Contudo, os compostos de baixo peso molecular continuam a ocorrer em maior percentagem em quase todas as nascentes, apresentando-se como exceção a Nascente do Sabugueiro, cuja percentagem de compostos com alto peso molecular foi de 68,9% (percentagem do somatório da concentração dos HAPs benzo(a)pireno, indeno(1,2,3-c,d)pireno, benzo(k)fluoranteno, benzo(b)fluoranteno, dibenzo(a,h)antraceno e benzo(g,h,i)perileno). Assim, verificou-se uma ocorrência de 40,1% de compostos de alto peso molecular para a Fonte do Covão do Curral, 37% para a Fonte da Jonja, 35,8% para a Fonte de S. Tomé. A Fonte do Covão do Boi não registou ocorrência de compostos de alto peso molecular.

Como anteriormente referido, dos 16 HAPs considerados como substância prioritárias pela EPA, apenas 8 são reconhecidos como substâncias prioritárias pela legislação que regula a qualidade da água (Decreto-Lei nº103/2010). Dessas 8, as espécies naftaleno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(ghi)perileno e indeno(1,2,3-cd)pyreno ocorrem em pelo menos 1 das águas amostradas, sendo que, destas, o benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(ghi)perileno e indeno(1,2,3-cd)pyreno são também consideradas substâncias prioritárias perigosas pela legislação. Dos compostos não considerados pela legislação portuguesa como substâncias

prioritárias apenas o fluoreno, o benzo(a)antraceno e o dibenzo(a,h)antraceno ocorrem nas águas analisadas.

No âmbito de um outro estudo, atualmente em curso, realizou-se uma campanha de amostragem em Fevereiro de 2013, cujos resultados importa aqui referir (Silva, *em preparação*).

Comparando os dados obtidos na campanha de 2013 com os anteriores (2011), verifica-se uma clara diminuição da concentração total de HAPs em todas as nascentes afetadas por fogos florestais (Fonte do Covão do Curral, Fonte da Jonja, Fonte de S. Tomé e Nascente do Sabugueiro) (quadro 7.10). Relativamente à Fonte do Covão do Boi, apesar de não haver registo da ocorrência de fogos florestais, observou-se um aumento da concentração de HAPs, o qual poderá explicar-se por variações na deposição atmosférica destes compostos sobre o solo.

O decréscimo observado nas concentrações de HAPs nas águas subterrâneas de nascentes afetadas por fogos pode ser explicado quer pela degradação destes compostos nos solos, ao longo do tempo, quer por influência climática. Com efeito, no ano de 2011 registou-se precipitação inferior ao normal (ver capítulo 3), contrariamente ao que se passou em Janeiro de 2013 (IPMA, 2013), em que a precipitação foi cerca do dobro do normal, na região da Serra da Estrela, gerando condições para uma maior diluição destes compostos nas águas subterrâneas de circuito mais superficial.

O composto naftaleno, à semelhança do observado em 2011, continua a ser o HAP com maior concentração nas nascentes Fonte do Covão do Curral (7,0 ng/L) e Fonte de S. Tomé (8,6 ng/L), tendo-se desta vez verificado a sua ocorrência em todas as águas analisadas. O benzo(g,h,i)perileno ocorreu em concentrações de 8,0 ng/L, 8,2 ng/L e 8,1 ng/L nas nascentes Fonte da Jonja, Fonte de S. Tomé e Fonte do Covão

do Boi, respetivamente. O indeno(1,2,3-cd)pyreno registou uma concentração de 6,2 ng/L na Fonte do Covão do Curral.

Quadro 7.10. Concentração de HAPs nas águas subterrâneas amostradas em 2013.

Composto	Teor em HAPs (ng/L)				
	Fevereiro de 2013				
	F. Covão do Curral	F. da Jonja	F. de S. Tomé	F. do Sabugueiro	F. do Covão do Boi
Nafataleno	7,0	3,1	8,6	6,0	2,3
Acenaftileno	<LOD	n.d.	<LOD	<LOD	<LOD
Acenafteno	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Fluoreno	n.d.	n.d.	<LOD	<LOD	<LOD
Fenantreno	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Antraceno	<LOQ (6,9)	<LOQ (6,9)	<LOQ (6,9)	<LOQ (6,9)	<LOQ (6,9)
Fluoranteno	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Pireno	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Benzo(a)antraceno	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Criseno	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Benzo(b)fluoranteno	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	<LOQ (5,9)
Benzo(k)fluoranteno	n.d.	<LOQ (2,7)	n.d.	n.d.	n.d.
Benzo(a)pireno	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Dibenzo(a,h)antraceno	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Benzo(ghi)perileno	n.d.	8,0	8,2	n.d.	8,1
Indeno(1,2,3-cd)pyreno	6,2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Somatório	13,2	11,1	16,8	6,0	10,4

n.d. – não detetado; LOQ – limite de quantificação; LOD – limite de deteção.

8. Conclusões e perspectivas futuras

Apresentam-se de seguida as conclusões e perspectivas futuras do trabalho realizado. Inicialmente expõe-se um resumo dos quadros geológico, geomorfológico, climatológico e hidrogeológico, as conclusões da investigação e, por fim, as perspectivas futuras.

Localizado no maciço da Serra da Estrela, o sector de Seia – Torre – Covilhã (SSTC), foi o alvo do presente estudo, de cariz, marcadamente, multidisciplinar. Com efeito, as metodologias e técnicas utilizadas tiveram origem em diversos ramos das Geociências, tais como: Geologia, Geomorfologia, Climatologia, Hidrogeologia, Geoquímica, Hidrologia Isotópica e Geofísica.

Os primeiros trabalhos basearam-se no reconhecimento do terreno, nomeadamente que respeita à geologia, à geomorfologia e à inventariação de pontos de água, e com a recolha de informação bibliográfica. Os trabalhos de campo, desenvolvidos entre Fevereiro de 2010 e Julho de 2012, contaram com diversas campanhas de amostragem de águas subterrâneas para análise química e isotópica. Ainda na fase inicial dos trabalhos, procedeu-se à caracterização geológica, geomorfológica, climatológica e hidrogeológica à escala regional e local.

A Serra da Estrela, situada na Zona Centro Ibérica do Maciço Ibérico, é dominada pelas megadescontinuidades denominadas por Falha de Bragança – Vilariga – Manteigas (FBVM) e Falha de Gouveia – Seia – Lousã (FGSL). Tanto no quadro geológico regional como no local, verifica-se o predomínio das rochas cristalinas sobre as rochas sedimentares, o que se traduz numa circulação hídrica subterrânea realizada, sobretudo, em meios fissurados e, em menor medida, em meios porosos. As principais unidades geológicas do SSTC são depósitos de

cobertura (aluviões, depósitos glaciários e fluvioglaciários), rochas metassedimentares do CXG (formação de rosmaninhal) e rochas graníticas (granito de Seia, granito do Covão do Curral, granito da Estrela, granito de Manteigas e granito da Covilhã). A mais importante estrutura tectónica local é a FBVM.

Relativamente ao quadro geomorfológico, a Serra da Estrela constitui um maciço montanhoso, de orientação geral NE-SW, que se destaca acima das regiões aplanadas que a circundam. As encostas, de declive marcado, são limitadas por escarpas de falha de traço retilíneo com dezenas de quilómetros de extensão, com declives de cerca de 1000 m no flanco sudeste e 1200 m no flanco noroeste. A área da Torre, situada a sudoeste, apresenta-se como a zona de maior altitude, culminam a 1993 m. Os processos glaciários e periglaciários, do Plistocénico Superior são, em grande medida, responsáveis pela morfologia da serra, sobretudo, das zonas de maior altitude. De um modo bastante evidente, a rede de fraturação do setor condiciona a rede de drenagem, na qual se observam, normalmente, troços retilíneos e inflexões marcadas.

O SSTC apresenta orientação WNW-ESE, com altitude entre 565 m e 1993 m e corresponde a uma área de cerca de 25km². O SSTC é composto por vários subsectores: (i) o flanco oriental do maciço montanhoso, entre a Covilhã e as Penhas da Saúde; (ii) a área planáltica nas imediações do Alto da Pedrice e dos Piornos; (iii) a portela da Nave de Santo António e as zonas adjacentes do vale do Zêzere e do vale da Ribeira da Alforfa; (iv) a encosta entre a Nave de Santo António e o Covão do Boi; (v) o planalto entre o Covão do Boi e a Lagoa Comprida; (vi) o flanco ocidental do maciço, entre a Lagoa Comprida, o Sabugueiro e Seia

O clima da Serra da Estrela é marcado pela transição entre a influência atlântica e mediterrânica e entre uma afeição mais continental e uma outra, mais litoral, resultado da sua ação de barreira orográfica. Segundo o método de classificação de

Köppen-Geiger, a Serra da Estrela situa-se no limite entre o clima temperado com verão quente e seco (CSa), e o clima temperado com verão seco e suave (CSb). A identidade climática do SSTC é condicionada pelas suas características morfológicas, tais como: a altitude, o relevo e a orientação das encostas. Apesar de à escala regional se verificar uma íntima relação entre o aumento da precipitação sob a forma de neve e o aumento da altitude, à escala local, nem sempre se verifica essa relação, uma vez que também a ação dos mecanismos de convergência e divergência dos fluxos das massas de ar condicionam a distribuição da quantidade e do tipo de precipitação. Quanto à temperatura média do ar, a região é classificada como tendo um regime térmico simples. Relativamente ao período de estudo, as médias mensal e anual de precipitação foram de 172,16 mm e 2065,92 mm, respetivamente, a média da temperatura máxima registada foi de 12,89°C e a média da temperatura mínima 5,58°C.

A Serra da Estrela insere-se na unidade hidrogeológica do Maciço Antigo, formada sobretudo por rochas cristalinas. Tal como se indicou anteriormente, enquadra-se na Zona Centro Ibérica, onde predominam aquíferos continentais, fissurados e livres, semiconfinados ou confinados, sobre aquíferos de origem sedimentar (continentais, porosos e livres). A região da Serra da Estrela encontra-se distribuída por três bacias hidrográficas: as bacias do Tejo e do Mondego, que ocupam a maior parte da área, e a bacia do Douro, a que corresponde uma pequena parte.

Como referido, realizou-se a inventariação de pontos de água subterrânea no sector de Seia – Torre – Covilhã. A rede de monitorização de pontos de água foi definida tendo em conta a representatividade espacial e geológica do setor, considerando igualmente a acessibilidade permanente das nascentes bem como a existência de caudal durante todo o ano. Para cada ponto de água inventariado foi preenchida uma ficha descritiva com informações gerais e com o registo médio dos

parâmetros físico-químicos medidos *in situ* ao longo de todas as campanhas de amostragem.

Com base no estudo hidrogeoquímico da região, foi possível classificar as águas subterrâneas como hipotermiais. Dada a tendência de variação da temperatura da água seguir a variação da temperatura média do ar ao longo do ciclo anual, estimou-se que a circulação das águas das nascentes estudadas seja pouco profunda, o que, de resto, é concordante com a ausência de artesianismo e com o comportamento hidrogeoquímico.

O pH médio das águas do SSTC varia entre 5,1 e 6,6, sendo classificado como normal para este tipo de águas. Os valores médios da condutividade eléctrica são inferiores a 100 $\mu\text{S/cm}$ (atingindo o mínimo de 6 $\mu\text{S/cm}$, na Fonte da Saibreira), exceto nos casos de águas contaminadas, nomeadamente, a Fonte do Espinhaço de Cão, a Mina da Torre (onde ocorre o valor máximo, 454 $\mu\text{S/cm}$) e a Nascente da Lagoa Comprida. Tendo em conta que, no caso das águas não contaminadas, os valores da mineralização total e, consequentemente, da condutividade eléctrica são relativamente reduzidos conclui-se, também por esta via, que os circuitos subterrâneos e os tempos de residência são curtos, com interação água-rocha pouco significativa.

Assim, as águas subterrâneas de emergência amostradas tendem a ser bastante representativas da água de precipitação local. Com base nos resultados analíticos dos iões maioritários das águas locais (num total de 128 amostras), foi possível verificar uma forte correlação entre a condutividade eléctrica e os iões sódio (0,96), cálcio (0,89) e cloreto (0,92). Verificou-se igualmente uma forte correlação entre os iões sódio e cloreto (0,95) e cálcio e cloreto (0,73) atribuindo-se estas correlações à potencial contaminação das águas por utilização de sal-gema (NaCl) e cloreto de cálcio (CaCl_2) nas operações de limpeza de neve e gelo das estradas.

No geral, as águas do setor apresentam fraca mineralização, com exceção das da Fonte do Espinhaço de Cão e da Mina da Torre (que são muito mineralizadas) e das da Fonte da Nave de Santo António e da Nascente da Lagoa Comprida (com mineralização abundante). Observa-se o predomínio da *facies* hidrogeoquímica cloretada-sódica verificando-se também a ocorrência de águas com *facies* bicarbonatada-sódica e cloretada-cálcica.

O estudo isotópico das águas subterrâneas do sector de Seia – Torre – Covilhã, permitiu determinar a reta das águas meteóricas locais (LMWL), de equação $\delta^2\text{H}=7,44\delta^{18}\text{O}+7,44$.

Determinou-se a relação entre a temperatura média do ar e a composição em isótopos de oxigénio-18 e deutério das águas locais, obtendo-se os valores 0,21‰/°C e 1,56‰/°C respetivamente. Foi verificado a relação de empobrecimento isotópico com o aumento da altitude, originado pelo designado efeito da altitude na composição isotópica das águas meteóricas. A relação entre os teores isotópicos nas águas subterrâneas locais e o aumento da altitude possibilitou também verificar que, por cada 100 metros de aumento de altitude, existe um empobrecimento isotópico de - 0,10‰ no teor de ^{18}O e de -1,0‰ no teor de ^2H .

Os resultados do estudo isotópico refletiram, também, o efeito de barreira climática da Serra da Estrela uma vez que, considerando nascentes situadas a altitudes muito próximas, os teores isotópicos das águas subterrâneas da encosta oriental são mais empobrecidos que os determinados em águas subterrâneas da encosta ocidental, verificando-se assim um empobrecimento em isótopos à medida que as massas de ar se movimentam do litoral para o interior como resultado de um fracionamento isotópico das massas de vapor de água.

A heterogeneidade de teores em trítio das águas subterrâneas do SSTC, indica que as águas estudadas são de circulação rápida e pouco profunda e,

consequentemente, com reduzido tempo de residência. Verificou-se uma maior concentração de trítio nos meses de primavera quando comparados com os meses de inverno, facto explicado pelo 'spring leak effect'.

Foram abordados três tipos de contaminação das águas subterrâneas por modificação hidrogeoquímica: as operações de limpeza de neve e gelo das estradas, a infiltração de águas de escorrência dos pavimentos rodoviários e a ocorrência de fogos florestais.

A utilização de sais na limpeza de neve e gelo das estradas constitui uma fonte de potencial contaminação das águas subterrâneas. Esta prática é recorrente no maciço montanhoso da Serra da Estrela, onde é habitual a utilização de sal-gema (NaCl) e em menor quantidade de cloreto de cálcio (CaCl_2) para manter a transitabilidade das vias da região. Assim, verificou-se que as águas do SSTC amostradas a jusante das estradas (Fonte da Nave de Santo António Sul, Fonte do Espinhaço de Cão, Mina da Torre e Nascente da Lagoa Comprida) apresentaram concentrações médias de sódio cerca de 7 vezes maiores do que as das nascentes situadas a montante, cerca de 15 vezes maiores no caso do cloreto e 8 vezes maior no caso do cálcio.

Tendo em conta a composição dos sais utilizados nas operações de limpeza das rodovias, é de supor que o incremento de concentração das referidas espécies químicas nas águas das nascentes a jusante da estrada esteja relacionado com a infiltração das águas de escorrência contaminadas.

Para além dos referidos sais, as águas subterrâneas também se encontram contaminadas por metais pesados como o cádmio, o crómio, o cobre, o chumbo e o zinco provenientes das águas de escorrência das estradas. Com efeito, observou-se uma maior concentração destes elementos nas águas amostradas a jusante da estrada, que constitui claro indício de contaminação. Dado que o aumento da

concentração dos íons sódio, cálcio e cloreto pode mobilizar metais pesados, é de esperar que as operações de limpeza de neve agravem este tipo de contaminação.

A contaminação das águas subterrâneas através de Na e Cl é, ainda, evidenciada pela evolução temporal da relação Na/Cl, a qual releva que a entrada destes íons nos sistemas hidrogeológicos de cada uma destas águas se faz em simultâneo.

Foi proposto um modelo conceptual do processo de contaminação das águas subterrâneas pela utilização de sais na limpeza de neve e gelo das rodovias. Segundo este modelo, uma vez que o pavimento da estrada é impermeável, a infiltração das águas de escorrência contaminadas faz-se, sobretudo, pelas bermas. Deste modo, a água contaminada entra na zona não saturada, a montante e a jusante da via, acabando por atingir o aquífero livre, dando origem a uma pluma de contaminação com fluxo subterrâneo para jusante. Finalmente, parte da água contaminada circula até à superfície emergindo em nascentes ou no leito de linhas de água, enquanto que outra parte atinge zonas mais profundas do sistema aquífero. À medida que a água contaminada se afasta da fonte de contaminação, regista-se uma diminuição das concentrações de cloreto, sódio e cálcio.

Como consequência do fogo florestal de Agosto de 2010, que afetou parte do SSTC, nomeadamente, a área envolvente da Fonte do Covão do Curral, verificou-se a ocorrência de um aumento da concentração dos catiões cálcio, potássio e magnésio. O referido aumento de concentrações foi mais notório no ano subsequente ao incêndio, tendo-se verificado uma diluição deste efeito ao longo do tempo.

Com o intuito de avaliar a circulação de água subterrânea contaminada por sais da limpeza das estradas, recorreu-se à utilização do método da resistividade elétrica no estudo hidrogeofísico do SSTC. Através da interpretação das tomografias elétricas obtidas, verificou-se a existência de plumas de contaminação nos locais estudados (as

vertentes oriental e ocidental da Nave de Santo António e as imediações da Fonte dos Pérús). Os resultados obtidos permitiram validar o modelo conceptual de contaminação da água subterrânea.

No âmbito do estudo destinado a avaliar o efeito dos fogos florestais na região da Serra da Estrela, determinou-se a concentração de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) em amostras de água recolhidas na Fonte do Covão do Curral, na Fonte da Jonja, na Fonte de São Tomé, na Nascente do Sabugueiro e na Fonte do Covão do Boi. As Fontes do Covão do Curral, São Tomé e a Nascente do Sabugueiro, sofreram o impacto do fogo florestal de Agosto de 2010, a Fonte da Jonja localiza-se na área florestal ardida no Verão de 2005, e a Fonte do Covão do Boi situa-se numa área sem qualquer registo de fogo. Verificou-se que o somatório da concentração dos HAPs nas águas emergentes na Fonte do Covão do Boi é consideravelmente inferior comparando com os outros pontos de amostragem, facto atribuído à inexistência de impacto de incêndios florestais. Comparando as nascentes situadas na região ardida em 2010 com a Fonte da Jonja, localizada na área ardida em 2005, não se verifica variação significativa na concentração total de HAPs das águas emergentes em cada uma delas.

De entre os possíveis rumos de investigação acerca da hidrogeologia da região da Serra da Estrela, são de destacar os relacionados com a hidrogeologia ambiental:

- Ampliação da área de estudo para novos setores da montanha;
- Alargamento do inventário hidrogeológico, considerando novos pontos de água subterrâneos e superficiais;
- Execução de novas campanhas de amostragem de águas subterrâneas para análise da hidrogeoquímica convencional e da hidrologia isotópica;

- Estudo da hidrogeoquímica convencional, hidrologia isotópica e dos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos de pontos de água superficiais, incluindo cursos superficiais e lagos;
- Implantação de uma rede piezométrica e de estações meteorológicas para o fornecimento de informações hidrogeológicas e climatológicas da região;
- Alargamento dos estudos de hidrogeofísica a outros locais para reconhecimento de estruturas geológicas de interesse hidrogeológico e melhorar o conhecimento acerca da contaminação das águas subterrâneas;
- Aprofundar o estudo das fontes de influência antrópica, tais como: impacte dos fogos florestais nas águas e solos, contaminação das águas subterrâneas pelas águas de escorrência das estradas e da utilização de sais nas operações de limpeza das rodovias;
- Aplicação de modelos matemáticos de fluxo e transporte de massa em meios subterrâneos;
- Levar a cabo estudos ecotoxicológicos destinados a aprofundar conhecimento acerca do efeito da contaminação na zona não saturada.

Referências bibliográficas

- ACavaco, 1990. Estudo de pesquisa hidrogeológica nas Caldas de Manteigas, 6 pp.
- ACavaco, 1991. Estudo de pesquisa hidrogeológica nas Termas de Manteigas – Relatório final, 19 pp.
- ACavaco, 1992. Sondagens de Pesquisa de Água Termal para as Termas de Manteigas – Relatório.
- ACavaco, 1994. Plano de exploração das Caldas de Manteigas – Relatório final.
- Acciaiuoli, L. M. C., 1952-1953. Le Portugal Hydromineral, 2 Vols. Vol. I, 1952, 284 pp.; Vol II, 1953, 574 pp. Direction Générale des Mines et Services Géologiques, Lisbonne.
- AEMET (Agencia Estatal de Meteorologia) e IM (Instituto de Meteorologia de Portugal), 2011. Atlas Climático Ibérico, Temperatura do Ar e Precipitação (1971-2000). 79 pp.
- Afonso, M. J.; Espinha Marques, J.; Marques, J. M.; Carreira, P.; Carvalho, J. M.; Marques da Silva, M.; Samper, J.; Veiga, B. P.; Borges, F. S.; Rocha, F. T.; Fonseca, P. E.; Gomes, A.; Araújo, M. A.; Vieira, G. T.; Mora, C.; Teixeira, J.; Almeida, P. G.; Gonçalves, J. A.; Chaminé, H. I., 2005. Hydrogeology of hard-rocks in the Portuguese Iberian Massif: Porto urban area and Serra da Estrela mountain region. in: J. P. Lopo Ferreira & J. Vieira, Eds, Proceedings The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources – Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability, Universidade do Minho, Guimarães, LNEC-IAHS (CD-Rom edition).

- Afonso, M. J.; Espinha Marques, J.; Marques, J. M.; Carreira, P. M.; Fonseca, P. E.; Gomes, A.; Martins Carvalho, J.; Samper, J.; Sodré Borg s, F.; Rocha, F. T.; Chaminé, H. I., 2006. Caracterização multidisciplinar dos recursos hídricos subterrâneos em áreas urbanas e montanhosas (Norte e Centro de Portugal): metodologias e técnicas. Atas do II Fórum Ibérico de  guas Engarrafadas e Termalismo. 9 pp. Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto.
- Afonso, M. J.; Chaminé, H. I.; Marques, J. M.; Carreira, P. M.; Guimarães, L.; Guilhermino, L.; Gomes, A.; Fonseca, P. E.; Pires, A.; Rocha F., 2010. Environmental issues in urban groundwater systems: a multidisciplinary study of the Paranhos and Salgueiros spring waters, Porto (NW Portugal). *Environmental Earth Sciences*, 61, 2, 379-392.
- Albaréde, F., 2003. *Geochemistry – An Introduction*. 251 pp. Cambridge University, Press.
- Alcoforado, M. J.; Alegria, M. F.; Pereira, A. R.; Sirgado, C., 1993. Domínios bioclimáticos em Portugal definidos por comparação dos índices de Gaussen e Emberger. *Linha de Ação de geografia Física*, 77 pp. Centro de Estudos Geográficos, Lisboa.
- Almeida, A.; Almeida, J. D., 1975. *Inventário Hidrogeológico de Portugal*. Instituto de Hidrologia de Lisboa, 3  Vol. – Beira Alta, Lisboa.
- Almeida, F. M.; Moura, J. E. C., 1972. *Carta das nascentes de Portugal*, Escala 1/1 000 000. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- Almeida, C.; Mendonça, J. L.; Jesus, M. R.; Gomes, A. J., 2000. *Sistemas aquíferos de Portugal Continental*, 3 Vols. Instituto da  guas/Centro de Geologia da Universidade de Lisboa, Lisboa.

- Amorim Ferreira, H., 1942. O clima de Portugal, valores médios dos elementos climáticos no período de 1901-1930, Fasc. I. Publicações do Observatório Infante D. Luiz, Lisboa.
- Amorim Ferreira, H., 1946. O clima em Portugal, Beria, Fasc. V. Serviço Meteorológico Nacional, Lisboa.
- Amorim Ferreira, H., 1970. Normais climatológicas do Continente, açores e Madeira correspondente a 1931-1960. in: O Clima de Portugal, 2ª Ed., Fasc. XIII, 207 pp. Lisboa.
- Andrade, E.; Mora, C.; Neves, M.; Vieira, G., 1992. Desportos de Inverno na Serra da Estrela. Contribuição para o estudo da sua viabilidade. Finisterra, Lisboa, 53-54: 187-193.
- Anderson, M. A., 2003. Encyclopedia of Water Science – Isotopes. Copyright by Marcel Dekker, Inc.
- Araguás-Araguás, L.; Froehlich, K.; Rozanski, K., 2000. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture. Hydrol. Process. 14:1341 – 1355.
- Arguez, A. ; Vose, R. S., 2011. The Definition of the Standard WMO Climate Normal – The Key to Deriving Alternative Climate Normals. American Meteorological Society.
- Atkins, P.; JONES, L., 2011. Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 5ª Edição. Editora Bookmam. Porto Alegre.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry), 1995. Toxicological Profile for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). Atlanta. Public Health Service. U. S. Department of Health and Human Services. 482 pp.
- Aureli, A., 2002. What's ahead in UNESCO's International Hydrological Programme (IHP VI 2002-2007). Hydrogeological Journal, 10: 349-350.
- Azevedo, A. J.; Marques, C. V., 1987. Atlas do Ambiente, Notícia Explicativa I. 1, Insolação., 19 pp. Secretaria de Estado do Ambiente e Recursos Naturais, Lisboa.

- Barbosa, A. E., 2002. Gestão Ambiental das Escorrências Pluviais de Estradas em Portugal – Presente e Futuro. *in*: LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil), 2006. Avaliação e gestão ambiental das águas de escorrência de estradas – Relatório Final. Estudo Realizado para o Instituto da Água. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.
- Barros, R. F., 1964. Nota sobre a geologia da região de Manteigas (Serrada Estrela). Bol. Mus. Labor. Miner. Geol. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 8, 2: 115-125.
- Batsala, M.; Chandu, B.; Sakala, B.; Nama, S.; Domatoti, S., 2012. Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). International Journal of research in pharmacy and chemistry. ISSN: 2231-2781.
- Bedient, P. B.; Rodgers, A. C.; Bouvette, T. C.; Tomson, M. B.; Wang, T.H.; 1984. Ground-water Quality at a Creosote Waste Site, Ground Water, 22:318-329.
- Bemgård, A.; Colmsjö; Wrangskog, K., 1994. Analytical Chemistry, 66, 4288-4294.
- Bettin, S. M.; Franco, D. W., 2005. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) em aguardentes. Cienc. Tecnol. Aliment.; 25(2):234-8.
- Birot, P., 1946. Contribution à l'étude morphologique de la région de Guard. Bull.Études Portugais, Lisboa, 47 pp.
- Blumer, M.,1988. Scientific American, 50, 35-48.
- Bonemen, H. D. ; Van de Laak, W. H. J., 2003. The Influence of Road Infrastructure and Traffic on Soil, Water and Air Quality. Environmental Management, Vol. 31, nº 1, pp. 50-68. Springer-Verlag. New York.
- Bouwer, H., 1978. Groundwater Hydrology, 480 pp. McGraw-Hill, Inc, New York.
- Brum Ferreira, A., 1991. Neotectonics in Northern Portugal: a geomorphological approach. Zeitschrift für Geomorphologie, Berlin-Stuttgart, N. F., 82: 73-85.

- Brum Ferreira, A., 1998. Short note on the morphology of the Serra da Estrela. in: G. T. Vieira, Ed., Glacial and Periglacial Geomorphology of the Serra da Estrela, Portugal. Guibook for the field-trip, Lisboa. 19-23 pp.
- Butler, J. J. Jr, 2005. Hydrogeological methods for estimation of spatial variations in hydraulic conductivity, in –hydrogeophysics. 23-58 pp. Edited by Y. Rubin and S. S. Hubbard, Springer, The Netherlands.
- Cabral, J., 1989. An exemple of intraplate neotectonic activity, Vilaríça Basin, Northeast Portugal. *Tectonics*, 8: 285-303.
- Cabral, J., 1995. Neotectónica em Portugal Continental. *Memórias do Instituto Geológico e Mineiro*, Lisboa, 31, 265 pp.
- Cabral, J.; Ribeiro, A., 1988. Carta Neotectónica de Portugal Continental na Escala 1/1 000 000. *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa.
- Cabral, J.; Ribeiro, A., 1989. Carta Neotectónica de Portugal Continental na Escala 1/1 000 000, Nota Explicativa, 10 pp. *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa.
- Calado, C., 1992. Carta de nascentes minerais, Escala /1 000 000. in: *Atlas do Ambiente*, Direção-Geral de Recursos Naturais/Ministério do Ambiente e Recursos Naturais, Lisboa.
- Calado, C. M. A., 2001. A ocorrência de água sulfúrea alcalina no Maciço Hespérico: quadro hidrogeológico e quimiogénese, 462 pp. anexos Universidade de Lisboa (Tese de Doutoramento).
- Calado, C.; Almeida, C., 1993. Geoquímica do flúor em águas minerais da Zona Centro-Ibérica. in: F. Noronha, M. Marques, P. Nogueira, Eds, IX Semana de Geoquímica e II Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, Porto, 1993. *Mem. Mus. Labor. Miner. Geol. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto*, 3: 319-323.
- Calvo, M. S., 1995. *El Gran Diccionario del Medio Ambiente y de la Contaminacion*. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, 807 pp.

- Carreira, P. M.; Monge Soares, A. M.; Valério, P.; Araújo, M. F.; Barbosa, T., 2003. Teores em trítio nas águas de precipitação em Portugal Continental: variabilidade e fatores condicionantes. pp. 315-329. Memórias e Notícias, nº 2. Publ. do Dep. Ciên. Terra e do Mus. Mineral. Geol. Universidade de Coimbra.
- Carreira, P. M.; Marques, J. M.; Espinha Marques, J.; Chaminé, H. I.; Fonseca, P. E.; Monteiro Santos, F.; Moura, R. M.; Carvalho, J. M., 2011. Defining the dynamics of groundwater in Serra da Estrela Mountain area, central Portugal: an isotopic and hydrogeochemical approach. *Hydrogeology Journal*, 19, 1, 117-131.
- Caruso, M. S. F.; Alaburda, J., 2008. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – benzo(a)pireno: uma revisão. *Ver. Inst. Adolfo Lutz*, 67(1): 1-27.
- Carvalho, A., 2008. Contribuição para o Conhecimento da Hidropedologia e da Hidrogeologia Ambiental na Região do Parque Natural da Serra da Estrela (Sector de Nave de Santo António-Torre). Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. (Tese de Mestrado).
- Carvalho, A.; Espinha Marques, J.; Marques, J. M.; Carreira, P.; Moura, R.; Guerner Dias, A.; Chaminé, H. I.; Rocha, F.; Saraiva, R.; Tavares, M.; Mansilha, C., 2012. Contaminação de águas subterrâneas por substâncias de limpeza da neve em estradas: o caso do setor da Nave de Santo António – Covão do Curral (Serra da Estrela, Centro de Portugal). *Comunicações Geológicas*. 99,1, 5-11. LNEG. Lisboa.
- Carvalho, J. M., 2006. Prospeção e pesquisa de recursos hídricos subterrâneos no Maciço Antigo Português: Linhas metodológicas, 292 pp. anexos e carta hidrogeológica. Universidade de Aveiro (Tese de Doutoramento).
- Carvalho, M. R.; Cruz, J. V.; Almeida, C.; Silva, M. O., 1990. Hidrogeoquímica das águas dos granitos hercínicos das Beiras. *Geolis*, Lisboa, 4, 1/2: 229-248.
- Castany, G., 1972. Prospección y explotación de las aguas subterráneas, 738 pp. Ed. Omega, Barcelona.

- Cavaleiro, V. M.; Riscado, J. F.; Almeida, P. G., 2007. Geotechnical properties in na alteration profile of the granite of Covilhã. The Second Half Century of Rock Mechanics. 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics, 3 Vol. C. Olalla, N. Grossman, L. Ribeiro e Sousa Edt.
- Chang, P. Y.; Alumbaugh, D.; Brainard, J.; Hall, L., 2006. Cross-borehole ground-penetrating radar for monitoring and imaging solute transport within the vadose zone. *Water Resources Research* 42, W10413.
- Chapman, P. M., 2007. Determining when contamination is pollution – Weight of evidence determinations for sediments and effluents. *Environment International*, 33 (2007), p. 492-501.
- Clark, I. D.; Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. in: Moore, J. E., 2002. *Field hydrogeology. A guide for site investigations and report preparation*. 195 pp. Lewis Publishers.
- CNA (Comissão Nacional do Ambiente), 1984a. *Atlas do Ambiente, Notícia Explicativa I.2, Temperatura (temperatura média diária do ar)*, 21 pp. Secretaria de Estado do Ambiente e Recursos Naturais, Lisboa.
- CNA (Comissão Nacional do Ambiente), 1984b. *Atlas do Ambiente, Notícia Explicativa I.4.1, I.4.2, Precipitação (quantidade total e número de dias no ano; precipitação igual ou superior a 1,0mm)*, 21 pp. Secretaria de Estado do Ambiente e Recursos Naturais, Lisboa.
- Connor, S. E.; Araújo, J.; O. Van der Knaap, W.; van Leeuwen, J. F. N., 2012. A long-term perspective on biomass burning in the Serra da Estrela, Portugal. *Quaternary Science Reviews* 55 (2012) 114-124. Elsevier, Ltd.
- CPS (Companhia Portuguesa de Serviços), sem data. *Aproveitamento hidroeléctrico do rio Zêzere (ficha de candidatura ao programa Valoren, Estudo técnico-económico, 24 pp. 4 anexos)*.
- Craig, H., 1961. Isotopic varitions in meteoric waters. *Science*, Washington, D. C., 133: 1702-1703.

- Cruz, J. V.; Silva, M. O., 1991. Enquadramento geológico-estrutural das nascentes termominerais da região de Viseu. *Geolis*, Lisboa, 1/2: 49-60.
- Curto Simões, M. M., 1993. Águas minerais Portuguesas: da sua caracterização físico-química ao esboço de uma classificação. *Bol. Min.*, Lisboa, 30: 13-26.
- Custódio, E.; Llamas, M. R., 1996. *Hidrologia subterrânea*, 2 Vols, 2350 pp. Omega, Barcelona.
- Dansgaard, W., 1964. Stable isotopes precipitation. p. 436-468. *Tellus* XVI 4.
- Daveau, S., 1969. Structure et relief de la Serra da Estrela. *Finisterra*, Lisboa, 4, 7-8: 33-197.
- Daveau, S., 1971. La glaciation de la Serra da Estrela. *Finisterra*, Lisboa, 6, 11: 5-40.
- Daveau, S., 1972. Répartition géographique des pluies exceptionnellement fortes au Portugal. *Finisterra*, Lisboa, 7, 13 : 5-28.
- Daveau, S., 1973. Quelques exemples d'évolution quaternaire des versants au Portugal. *Finisterra*, Lisboa, 8, 15: 5-47.
- Daveau, S., 1978. Le périglaciaire d'altitude au Portugal. in: *Colloque sur le périglaciaire d'altitude du domaine méditerranéen et ses abords*, Strasbourg, 63-78.
- Daveau, S., 1981. A expedição científica à Serra da Estrela organizada pela Sociedade de Geografia de Lisboa em Agosto de 1981. *Finisterra*, Lisboa. 32: 314-318.
- Daveau, S., 1985. Mapas climáticos de Portugal. Nevoeiro e Nebulosidade. Contrastes térmicos. *Memórias do Centro de Estudos Geográficos*, Lisboa, nº7, 84 pp.; 2 mapas.
- Daveau, S., 2004. A Cordilheira Central. in: M. Feio & S. Daveau, *Coords, O relevo de Portugal, Grandes unidades regionais*, Coimbra, Vol.2, 75-96. Associação Portuguesa de Geomorfologia.

- Daveau, S.; Coelho, C.; Costa, V. G.; Carvalho, L., 1977. Répartition et rythme des précipitations au Portugal. Memórias do Centro de Estudos Geográficos, Lisboa, nº 3, 192 pp. ; 3 mapas.
- Daveau, S.; Ferreira, A. B.; Ferreira, N.; Vieira, G., 1997. Novas observações sobre a glaciação da Serra da Estrela. Estudos do Quaternário, Lisboa, 1: 41-51.
- Day-Lewis, F. D.; Singha, K.; Binley, A. M., 2005. Applying petrophysical models to radar travel time and electrical resistivity tomograms: resolution-dependent limitations. Journal of Geophysical Research 110, B08206.
- Delgado, N., 1888, Note sur l'existence d'anciens glaciers dans la vallée du Mondego. Commn. Direcç. Trab. Geol. Portugal, Lisboa, 3: 55-83.
- DGRAH (Direção-Geral dos Recursos e Aproveitamento Hidráulico), 1984. Aproveitamento dos recursos hidráulicos do Maciço da Serra da Estrela (vertentes dos rios Mondego e Zêzere). A – Inventário dos recursos hídricos. Lisboa, Vol. I-IV.
- DR (Diário da República), 1998. Decreto-Lei n.º 236/1998 – Descarga de águas residuais. Ministério do Ambiente.
- DR (Diário da República), 2005. Lei n.º 58/2005 – Lei da Água. Assembleia da República.
- DR (Diário da República), 2007. Decreto-Lei n.º 306/2007 – Qualidade da água destinada a consumo humano. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.
- DR (Diário da República), 2010. Decreto-Lei n.º 103/2010 – Qualidade da água. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território.
- Domenico, P. A.; Schwartz, F. W., 1998. Physical and Chemical Hydrogeology. 2ª Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Drever, J. J., 1997. The geochemistry of natural waters – surface and groundwater environments. Third Edition. Prentice – Hall, Inc.

- EC (European Commission), 2002. Health and Consumer Protection Directorate-General. Polycyclic aromatic hydrocarbons – Occurrence in foods, dietary exposure and health effects. SCF/CS/CNTM/PAH/29 ADD1 Final. Brussels.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2002. Managing highway deicing to prevent contamination of drinking water. Source Water Protection Practices Bulletin. EPA 816-F-02-019.
- Epstein, S.; Mayeda, T., 1953. Variations of $\delta^{18}\text{O}$ content of waters from natural sources. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 4, 213-224.
- Espinha Marques, J, 2007. Contribuição para o conhecimento da hidrogeologia da Região do Parque Natural da Serra da Estrela, 378 pp. Universidade do Porto (Tese de Doutoramento)
- Espinha Marques, J., 2010. Hidrogeologia da Região da Serra da Estrela (sector de Manteigas – Nave de Santo António – Torre): uma abordagem multidisciplinar. in: J. M. Coteló Neiva, A. Ribeiro, M. Victor, F. Noronha, M. Ramalho (Eds). *Ciências Geológicas: Ensino, Investigação e sua História*, Vol. II. Publicação Comemorativa do 'Ano Internacional do Planeta Terra'. Associação Portuguesa de Geólogos. Sociedade Geológica de Portugal.
- Espinha Marques, J.; Marques, J. M.; Afonso, M. J.; Carreira, P. M.; Fonseca, P. E.; Cabral, J.; Monteiro Santos, F. A.; Vieira, G. T.; Mora, C.; Gomes, A.; Teixeira, J.; Samper, J.; Pisani, B. J.; Aguiar, C.; Gonçalves, J. A.; Almeida, P. G.; Cavaleiro, V.; Carvalho, J. M.; Borges, F. S.; Aires-Barros, L.; Rocha, F., 2005. Hydrogeological study of a high mountain area (Serra da Estrela, Central Portugal): a multidisciplinary approach. *Cadernos Labor. Xeol. Laxe*, A. Coruña, 30: 145-166.

- Espinha Marques, J.; Duarte, J. M.; Constantino, A. T.; Martins, A. A.; Aguiar, C.; Rocha, F. T.; Inácio, M.; Marques, J. M.; Chaminé, H. I.; Teixeira, J.; Samper, J., Borges, F. S.; Carvalho, J. M., 2007. Vadose zone characterisation of a hydrogeologic system in a mountain region: Serra da Estrela case study (Central Portugal). In: L. Chery & Gh. de Marsily (Eds.), *Aquifer systems management: Darcy's legacy in a World of impending water shortage*, SP-10 Selected papers on Hydrogeology, IAH, Taylor & Francis Group, Volume 10, 207-221.
- Espinha Marques, J.; Marques, J. M.; Aguiar, C., 2009. A groundwater system in a mountain environment (Serra da Estrela, Portugal). in: Evelpidou N., Figueiredo T., Mauro F., Vahap A. & Vassilopoulos A. (Eds), *Natural Heritage in Europe from East to West*. Springer-Verlag, 163-167.
- Espinha Marques, J.; Marques, J. M.; Aguiar, C., 2010. A groundwater system in a mountain environment (Serra da Estrela, Portugal): 4pp. in: N. Evelpidou, T. de Figueiredo, F. Mauro, A. Vahap & A. Vassilopoulos (Eds.) *Natural Heritage in Europe from East to West*. Springer Verlag, Berlin, 163-167. DOI 10.1007/978-3-642-01577-9-20.
- Espinha Marques, J.; Samper, J.; Pisani, B.; Alvares, D.; Carvalho, J.M.; Chaminé, H. I.; Marques, J. M.; Vieira, G. T.; Mora, C., Borges, F. S., 2011a. Evaluation of water resources in a high-mountain basin in Serra da Estrela, Central Portugal, using a semi-distributed hydrological model. *Environmental Earth Sciences*, 62, 6, 1219-1234.
- Espinha Marques, J.; Carvalho, A.; Marques, J. M.; Chaminé, H. I.; Guerner, A.; Moura, R.; Carreira, P.; Neves, O.; Samper, J.; Rocha, F., 2011b. Methodology for assessing the impact of the use of road salt on groundwater resources in a mountain environment (Serra da Estrela, Central Portugal). *Cadernos Lab. Xeol. Laxe, A Coruña*, 36, 79-98.

- Espinha Marques, J.; Marques, J. M.; Carreira, P. M.; Fonseca, P. E.; Monteiro Santos, F. A.; Moura, R.; Samper, J.; Pisani, B.; Teixeira, J.; Carvalho, J. M.; Rocha, F.; Borges, F. S., 2013. Conceptualizing a mountain hydrogeologic system by using an integrated groundwater assessment (Serra da Estrela, Central Portugal): a review. *Geosciences Journal*. The Association of Korean Geoscience Societies and Springer.
- ET (Earth Talk), 2010. What are the environmental impacts of all the de-icing and snow removal? *Earth Talk from the Editors of: The Environmental Magazine*, Westport.
- Ewing, G. W., 2002. *Métodos Instrumentais de Análise Química*. Editora Edgar Blücher. São Paulo.
- Faure, G. & Messing, T. M., 2005. *Isotopes: principles and applications*, 896 pp. John Wiley and Sons, New Jersey.
- Feitosa, A. C. F., 2000. *Hidrogeologia, Conceitos e Aplicações*. CPMR, Serviços Geológicos do Brasil. 391 pp.
- Ferreira, H. A., 1943. Distribuição da chuva no território do Continente Português. 14 pp.; 1 mapa. Observatório do Infante D. Luiz, Lisboa.
- Ferreira, M. M. S. I., 2005. *Dados geoquímicos de base de solos de Portugal Continental, utilizando amostragem de baixa densidade*, 286 pp.; anexos+atlas. Universidade de Aveiro (Tese de Doutoramento).
- Ferreira, N.; Iglésias, M.; Noronha, F.; Pereira, E.; Ribeiro, A.; Ribeiro, M. L., 1987. Granotóides da Zona Centro-Ibérica e seu enquadramento geodinâmico. in: F. Bea, A. Carnicero, J. C. Gonzalo, M. López Plaza & M. D. Rodríguez Alonso, Eds. *Geología de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hespérico (Libro de Homenaje a L. C. García de Figuerola)*, 37-51. Editorial Rueda, Madrid.

- Ferreira, N.; Vieira, G., 1999. Guia geológico e geomorfológico do Parque Natural da Serra da Estrela .Locais de interesse geológico e geomorfológico, 112 pp.; 1 mapa. Parque Natural da Serra da Estrela. Edição Instituto da Conservação da Natureza/Instituto Geológico e Mineiro. Lisboa.
- Ferreira, N.; Dias, G.; Meireles, C. A. P.; Braga, A.; Francisco, S.; Santos, M. A. S., 2000. Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000. Notícia Explicativa da folha 5-D – Braga, 68 pp. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.
- Ferreira, T. B. E. L. L., 1997. Metodologias para a Reabilitação de Aquíferos Poluídos. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Teses e Programas de Investigação do LNEC, TPI 11, 493 pp. (Tese de Doutoramento).
- Ferronsky, V. I.; Polyakov, V. A., 1982. Environmental isotopes in the hydrosphere. International Journal of Climatology. Volume 3, 427 pp. John Wiley & Sons, Edit.
- Fetter, C. W., 1999. Contaminant Hydrogeology, 500 pp. Prentice-Hall, New Jersey.
- Fetter, C. W., 2001. Applied Hydrogeology. 4th Ed., 598 pp. Prentice Hall, New Jersey.
- Fetzer, J. C., 2000. The Chemistry and Analysis of the Large Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Edt. Wiley. New York.
- Fitts, C. R., 2002. Groundwater science, 450 pp. Academic Press, London.
- Fleury, E., 1916. Sur les anciennes glaciations de la Serra da Estrela (Portugal). C. R. hebdomadaire des Séances Acad. Sci., Paris, 162: 559-601.
- Fontes, J., 1983. Dating of groundwater. *in*: Carreira, P. M.; Monge Soares, A. M.; Valério, P.; Araújo, M. F.; Barbosa, T., 2003. Teores em trítio nas águas de precipitação em Portugal Continental: variabilidade e fatores condicionantes. pp. 315-329. Memórias e Notícias, nº 2. Publ. do Dep. Ciên. Terra e do Mus. Mineral. Geol. Universidade de Coimbra.
- Fraústo da Silva, J. J.; Vaz, M. C. T. A., 1988. Lições de Química-Física Hidrológica. 139 pp. Instituto Português de Hidrologia.
- Freeze, R. A.; Cherry, J. A.; 1979. Groundwater, 604 pp. Presentice Hall, Inc. New Jersey.

- Friedel, M. J., 2005. Coupled inverse modeling of vadose zone water, heat, and solute transport model: optimal nonlinear parameter estimation and predictive uncertainty. *in*: Tellman, J. H.; Rivett, M. O.; Israfilov, R., 2006. Urban groundwater management and sustainability. Nato science series. Series IV, Earth and environmental sciences. Springer Edt.
- Friedman, I., 1953. Deuterium content of natural waters and other substances. *Goechim. Cosmochim. Acta*, 4:89-103.
- Furman, A.; Ferrea, T. P. A.; Warrick, A. W., 2004. Optimization of ERT surveys for monitoring transient hydrological events using perturbation sensitivity and genetic algorithms. *Vadose Zone Journal* 3, 1230–1239.
- Furuta, N.; Otsuki, A., 1983. *Analytical Chemistry*, 55, 2407-2413
- Garcia, D., 1986. Étude isotopique et géochimique des eaux thermales des Vosges Méridionales, application géothermique. Thèse de 3e cycle présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Académie de Montpellier. Document BRGM, 112.
- Gat, J. R., 1981. Groundwater. Stable isotope hydrology. Deuterium and oxygen-18 in the water cycle. IAEA tech. Report series 210, 223-240.
- Gat, J. R. ; Mook, W. G.; Meijer, H. A. J., 2001. Atmospheric water. *in*: Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Principles and Applications. Ed. W. G. Mook, IHP-V Technical Documents in Hydrology. UNESCO – IAEA, Vol II (39); 113 pp.
- Geyh, M. A., 2000. Environmental isotopes in the hydrological cycle. 196 pp. Technical Documents in Hydrology, N° 39, Vol. IV – Groundwater. Unesco, Paris.
- Giroux, B. ; Chouteau, M., 2008. A hidrogeophysical model generator. *Computers & Geosciences* 34 (2008) 1080-1092. Elsevier Ltd.
- Gleick, P. H., 1998. The World's Waters: The Biennial Report on Fresh Water Resource. Washington, D. C.; Island Press.

- Godwin, K. S.; Hafner, S. D.; Buff, M. F., 2003. Long-term trends in sodium and chloride in the Mohawk River, New York: the effect of fifty years of road-salt application. *Environmental Pollution*, 124, 2, 273-281.
- Gonfiantini, R., 1981. The δ -notation and the mass-spectrometric measurement techniques. *in*: Stable isotope hydrology, deuterium and oxygen-18 in the water cycle. J. R. Gat & R. Gonfiantini (eds.) IAEA, Vienna. Technical Report Series N° 210: 35-84.
- Gonfiantini, R.; Araguás-Araguás, L.; Rozanski, K., 1990. Tritium in precipitation: comparison between the years of high tritium (1963-67) and recent years. *Bulletin of Radiation Protection*, 13:1-6.
- Gourcy, L. L.; Groening, M.; Aggarwal, P. K., 2005. Stable Oxygen and Hydrogen Isotopes in Precipitation. P. K. Aggarwal, J. R. Gat & K. F. O. Froehlich (eds.), *Isotopes in the Water Cycle: Past, Present and Future of a Developing Science*, 39-51. IEA. Netherlands.
- Granato G.E., 1996. Deicing chemicals as source of constituents of highway runoff. *Transportation Research Record*, 1533, 50-58.
- Gunter, F.; Messing, T. M., 2005. *Isotopes: Principles and Applications*, 928 pp. John Wiley and Sons, New York.
- Guo Q.; Wang Y., 2009. Trace Element Hydrochemistry Indicating Water Contamination in an Around the Yangbajing Geothermal Field, Tibet, China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 83, 608-613.
- Hantush, M., 2003. Aquifer Transmissivity. *Encyclopedia of Water Science*. Marcel Dekker. New York.
- Harris, D. C., 1998. *Quantitative Chemical Analysis*. Fifth Edition. W. H. Freeman and Company. New York.
- Harvey, R., G., 1998. *The Handbook of Environmental Chemistry of PAHs and Related Compounds*, Vol. 3-Part I, A., H, Neilson Editor, Springer Verlag.

- Hassan, R.; Scholes, R.; Ash, N., 2005. Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends: Finding of the Conditions and Trends Working Group. Millennium Ecosystem Assessment, Series Vol. 1, 917 pp. Island Press, Washington, D. C.
- Hawkins, R. H.; Judd, J. H., 1973. Water pollution as affected by street salting. Journal of the American Water Resources Association, 8, 6, 1246-1252.
- Hawthorne, S. B., Yang, Y.; MILLER, D. J., 1994. Analytical Chemistry, 66, 2912-2920
- Heath, R. C., 1983. Basic groundwater hydrology. 2220 pp. U.S. Geological Survey Water Supply Paper.
- Hem, J. D., 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. 3ª Edt. 263 pp. U.S. Geological Survey Water Supply Paper.
- Henner, P.; Schiavon, M.; Morel, J. L.; Lichtfouse, É., 1997. Analisis Magazine, 25, M56-M59
- Henriques, F. F., 1726. Arquilégio Medicinal. 309 pp. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, (Edição fac-similada).
- Herculano de Carvalho, A., 1968. Relatório da análise química e físico-química das águas dos furos de sonda efetuados nas Caldas de Manteigas. Instituto de Hidrologia de Lisboa.
- Hoefs, J., 2004. Stable isotope geochemistry, 244 pp. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Horibe, Y.; Kobayakawa, M., 1960. Deuterium abundance of nature waters. Geochim. Cosmochim. Acta, 20: 273-283.
- Hubbard, S.; Rubin, Y.; Majer, E., 1999. Spatial correlation structure estimation using geophysical data. Water Resources Research 35 (6), 1809–1825.
- Hudak, P.F., 2001. Principals of Hydrogeology. CRC Press. LLC.

- IAEA (International Atomic Energy Agency), 1976. Procedure and technique critique for tritium enrichment by electrolysis at IAEA laboratory, Technical Procedure nº19, Vienna.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 1981. Stable Isotope Hydrogeology. Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. IEAE, Vienna, Technical Reports Series 210, 377 pp.
- IARC (International Agency for Research on Cancer, 1983. IARC Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans. Polynuclear Aromatic Compounds, Part 1, Chemical, Environmental and Experimental Data, Volume 32, 477 pp. Lyon, France.
- ICN (Instituto da Conservação da Natureza), 2006. Relatório sobre incêndios rurais na Rede Nacional de Áreas Protegidas e na Rede Natura 2000. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, Lisboa.
- IGM (Instituto Geológico e Mineiro), 1999. Recursos geotérmicos em Portugal Continental (baixa entalpia). (Edição em CD-ROM).
- INAG (Instituto da Água), 1999. Plano de bacia hidrográfica do rio Tejo. 1ª fase: análise e diagnóstico da situação de referência. Vol. 1 (Síntese); Anexo temático 1 (Análise Biofísica). Lisboa.
- Ingraham, N. L., 1998. Isotopic variations in precipitation. Isotope Tracers in Catchment Hydrology. C. Kendal, J. F. McDonnell (Eds) Chapter 3, 87-118. Elsevier. Amsterdam.
- INMG (Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica), 1991. O clima de Portugal. Normais climatológicas da região de 'Trás-os-Montes e Alto Douro e Beira Interior correspondentes a 1951-1980. Lisboa. Fasc. XLIX (Vol. 3-3ª Região), 70 pp.
- IPCS (International Programme on Chemical Safety), 1998. World Health Organization. Environmental Health Criteria 2002. Selected non-heterocyclic. Polycyclic aromatic hydrocarbons. Geneva.

- Jenkins, S.R.; Moore, R.C., 1977. A proposed modification to the classical method of calculating alkalinity in natural waters. *J. Amer. Water Works Assoc.* 69:56.
- Jones, K. C.; Stratfort, J. A.; Waterhouse, K. S.; Vogt, N. B., 1989. Organic Contaminants in Welsh Soils : Polynuclear Aromatic Hydrocarbons. *Environmental Science Technology*, Vol. 23, No. 5.
- Joussaume, S.; Jouzel, J.; Sadourny, R., 1984. Water isotope cycles in the atmosphere: First simulation using a general circulation model. *in*: Rozanski, K.; Aráguas, L.; Gonfiantini, R., 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. *Climatic Changes in Continental ISotopic Records*. Am. Geophys. Union, Geophys. Monogr., vol. 78, American Geophysical Union, Washington, D. C., pp. 1-36.
- Jouzel, J.; Russel, G. L.; Suozzo, R. J.; Koster, R. D.; White, J. W. C.; Broecker, W. S., 1987. Simulations of the HDO and H¹⁸O atmospheric cycles using the NASA GISS general circulation model: The seasonal cycle for present-day conditions. Rozanski, K.; Aráguas, L.; Gonfiantini, R., 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. *Climatic Changes in Continental ISotopic Records*. Am. Geophys. Union, Geophys. Monogr., vol. 78, American Geophysical Union, Washington, D. C., pp. 1-36.
- Karlberg, B.; Pacey, G. E., 1989. *Flow Injection Analysis - A Practical Guide*. Elsevier.
- Kearey, P.; Brooks, M.; Hill, I., 2002. *An introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science. Third edition. 281 pp.
- Keller, E. A., 2000. *Environmental Geology- Eighth Edition*. Prentice-Hall, Inc.
- Kendall, C.; McDonnell, J. J., 1998. *Isotope tracers in catchement hydrology*, 861 pp. Elsevier, Amsterdam.
- Kim, J. H.; Gan, J.; Farmer, W. J.; Yates, S. R.; Papiernik, S. K.; Dungan, R. S., 2003. Organic matter effects on phase partition of 1,3-dichloropropene in soil. *J. Agric. Food Chem.*, 51(1):165-169.

- Klaassen, C. D.; Amdur, M. O.; Doull, J., 1996. Casarett and Doull's toxicology: the basic science of poison. 5. Ed. New York: McGraw-Hill.
- Knödel, K; Lange, G.; Voigt, H. J., 2007. Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies. Springer-Verlag. Berlin, 1357 pp.
- Larson, T.E.; Henley, L.M., 1955. Determination of low alkalinity or acidity in water. Anal. Chem. 27:851.
- Lautensach, H., 1929. Eiszeitstudien in der Serra da Estrela (Portugal). Zeitschrift für Gletcherkunde, Berlin, 17: 324-369.
- Lautensach, H., 1932a. Estudo dos glaciares da Serra da Estrela. Memórias e Notícias, Coimbra, 6: 1-60.
- Lautensach, H., 1932b. Portugal. Auf Grund eigener Reisen und der Literatur. I Das Land als Ganz. Petermanns, Mitteilungen, Ergänzungsheft 213, Gotha, 187 pp.
- Lawrence, J. S.; White, J. W. C., The elusive climate signal in the isotopic composition of precipitation. *in*: Rozanski, K.; Aráguas, L.; Gonfiantini, R., 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. Climatic Changes in Continental Isotopic Records. Am. Geophys. Union, Geophys. Monogr., vol. 78, American Geophysical Union, Washington, D. C. 36 pp.
- Lee, B. K.; Vu, V. T., 2010. Sources, Distribution and Toxicity of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Particulate Matter. Air Pollution. Vanda Villanyi (Edit.). Chapter 5. 99-122.
- Leitão, T. E.; Lehmann, N.; Smets, S.; Lobo Ferreira, J. P. C.; Holm, P., 2000. Pollution from Road and Vehicles and Dispersal to the Local Environment: Mass Flux and Mass Balance Calculations; Assessment of Pollution of Groundwater and Soils by Road and Traffic Sources. 47 pp. LNEC.
- Lepierre, C., 1930-1931. Chimie et physico-chimie des Eaux. *in*: Le Portugal hydrologique et climatique, Vol.1, 75-106.
- LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil), 2006. Avaliação e gestão ambiental das águas de escorrência de estradas – Relatório Final. Estudo Realizado para o

- Instituto da Água. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.
- LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil), 2009. Avaliação do Impacte de Fogos Florestais nos Recursos Hídricos Subterrâneos – Relatório Final de Execução Material. 565 pp. I & D Hidráulica e Ambiente. Lisboa.
- Loke, M. H., 1999. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2- D and 3- D surveys. 63 pp. Copyright by Dr. M. H. Loke.
- Loke, M. H., Barker, R. D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44:131-152.
- Lopes, W. A.; Andrade, J. B., 1996. Fontes, formação, reatividade e quantificação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) na atmosfera. *Quim Nova*, 19(5):497-516.
- Lucas, L. L.; Unterweger, M. P., 2000. Comprehensive review and critical evaluation of the half-life of tritium. *in*: Carreira, P. M.; Marques, J. M.; Espinha Marques, J.; Chaminé, H. I.; Fonseca, P. E.; Monteiro Santos, F.; Moura, R. M.; Carvalho, J. M., 2011. Defining the dynamics of groundwater in Serra da Estrela Mountain area, central Portugal: an isotopic and hydrogeochemical approach. *Hydrogeology Journal*, 19, 1, 117-131.
- Luzes, O; Lepierre, C.; Narciso, A.; d'Arrochela, C.; Leite, A. P., 1934-1935. *Le Portugal hydrologique et climatique*, Vol. 3, 326 pp. Direção Geral de Minas e Serviços Geológicos e Instituto de Hidrologia e Climatologia de Lisboa.
- Mariño, M. A., 2003. *Aquifers*. Encyclopedia of Water Science. Marcel Dekker. New York.
- Marques, J. M., 1999. Geoquímica dos fluídos e da interação água-rocha: os casos das águas mineralizadas quentes e frias de Chaves, Vilarelho da Raia, Vidado e

- Pedras Salgadas, 276 pp. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa (Dissertação de Doutoramento).
- Marques, J. M.; Espinha Marques, J.; Carreira, P. M.; Graça, R. C.; Aires-Barros, L.; Martins Carvalho, J.; Chaminé, H. I.; Sodré Borges, F., 2003. Geothermal fluids circulation at Caldas do Moldeo area, Northern Portugal: Geochemical and isotopic signatures. *Geofluids*, 3: 189-201.
- Marques, J. M.; Carreira, P. M.; Espinha Marques, J.; Chaminé, H. I.; Fonseca, P. E.; Monteiro Santos, F. A.; Almeida, E.; Gonçalves, R.; Almeida, P. G.; Gomes, A.; Teixeira, J.; Carvalho, J. M.; Rocha, F. T., 2008. Role of high mountain areas in catchment hydromineral resources – Northern/Central Portugal: environmental issues. *in*: Rico P., Brebbia, C.A. & Villacampa Esteve Y. (Eds.), *Water Pollution IX, Second International Conference on Sustainable Irrigation Management, Technologies and Policies*. WIT Transactions, Southampton, 95-104.
- Mateus, A., 1995. Evolução tectono-térmica e potencial metalogenético do troço transmontano da Zona da Falha Manteigas-Vilarica-Bragança, (Tomo I, 195 pp.), (Tomo II, 994 pp.). Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (Tese de Doutoramento).
- Mateus, A.; Ribeiro, A.; Barriga, F. J. A. S., 1995. Pore fluid and sismogenic characteristics of fault rocks within the Vilarica Fault Zone (NE Portugal): evidences for deep fluid circulation during the uplift of the variscan continental crust. *in*: Borges, F. S.; Marques, M. (Eds.), *Mem. Mus. Labor. Miner. Geol. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto*, 4: 281-285.
- Mazor, E., 2004. *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*. 3^o Edition. Marcel Dekker, Inc. New York.

- Mendes, J. C.; Bettencourt, M. L., 1980. Contribuição para o estudo do balanço climatológico de água no solo e classificação climática de Portugal Continental. *in*: O Clima de Portugal, 24: 1-289. Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica.
- Merlivat, M.; Jouzel, J., 1979. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen-18 relationship for precipitation. *in*: Rozanski, K.; Aráguas, L.; Gonfiantini, R., 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. Climatic Changes in Continental Isotopic Records. Am. Geophys. Union, Geophys. Monogr., vol. 78, American Geophysical Union, Washington, D. C. 36 pp.
- Mikkelsen, P. S.; Häfliger, M.; Ochs, M.; Tjell, J. C.; Jacobsen, P.; Boller, M., 1996. Experimental assessment of soil and groundwater contamination from two old infiltration systems for road run-off in Switzerland. The Science of the Total Environment 189/190 pp. 341-347. Elsevier.
- Miranda, P. M. A.; Valente, M. A.; Tomé, A. R.; Trigo, R.; Coelho, M. F. E. S.; Aguiar, A.; Azevedo, B., 2006. O Clima de Portugal nos séculos XX e XXI, *in*: F. D. Santos & P. Miranda, Eds. Alterações climáticas em Portugal – cenários, impactos e medidas de remediação. Projeto SIAM II, 505 pp. Gradiva, Lisboa.
- Montaser, A.; Golightly, D. W., 1992. Inductively Coupled Plasmas in Analytical Atomic Spectrometry, VCH Publishers, Inc. New York.
- Mook, W. G., 2000. Environmental isotopes in hidrological cycle. Principles and applications. IHP-V, Technical Documents in Hydrology (UNESCO/IAEA), N° 39, Vol I., 280 pp.
- Moore, J. E., 2002. Field hydrogeology. A guide for site investigations and report preparation. 195 pp. Lewis Publishers.
- Mora, C., 2006. Climas da Serra da estrela, características regionais e particularidades locais dos Planaltos e do Alto Vale do Zêzere, 427 pp. Universidade de Lisboa (Tese de Doutoramento).

- Mora, C., 2009. Padrões térmicos no alto Vale do Zêzere. Condicionantes Topográficas e Meteorológicas. *Finisterra*, XLIV, 87. 55-69.
- Mora, C., 2010. A synthetic map of the climatopes of the Serra da Estrela (Portugal), *Journal of Maps*, v2010, 591-608. 10.4113/jom.2010.1112.
- Mora, C.; Vieira, G. T.; Alcoforado, M. J., 2001. Daily minimum air temperatures in the Serra da Estrela, Portugal. *Finisterra*, Lisboa, 36, 71: 49-60.
- Morais, J. C., 1946. Estudo sobre o Clima de Portugal. Publ. do Instituto de Climatologia e e Hidrologia da Universidade de Coimbra, VIII.
- Morais, J. C., 1950. Divisão climática de Portugal. 27 pp. Instituto de Climatologia e Hidrologia da Universidade de Coimbra.
- Moreira, V. S., 1985. Sismotectonics of Portugal and its adjacente áreas in the Atalntic. *Tectonophyysicis*. 117: 85-96.
- Moser, H.; Wolf, M.; Fritz, P.; Fontes, J-Ch.; Florkowski, T.; Payne, B., 1989. Deuterium, oxygen-18 and tritium in Stripa groundwater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 5, 1757-1763.
- Murakami, M.; Nakajima, F.; Furumai, H, 2007. The sorption of heavy metal species by sediments in soakaways receiving urban road runoff. *Chemosphere* 70 pp. 2099-2109. Elsevier.
- Narciso, A., 1930-1931. Climat et stations climatiques. in: *Le Portugal hydrologique et climatique*, Vol. 1, 31-74.
- Neiva, A. M. R.; Neiva, J. M. C., Parry, S. J., 1987. Geochemistry of the granitic rocks and their minerals from Serra da Estrela, Central Portugal. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 51: 439-454.
- Niederfellner, J.; Lenoir, D.; Matuschek, G.; Rehfeldt, F.; Utschick, H.; Brüggemann, R., 1997. Quantitative Structure-Activity Relationships, 16, 38-48.
- NU (Nações Unidas), 2012. Fatos sobre água e saneamento. Rio + 20, o futuro que queremos. Departamento de Informação Pública das Nações Unidas. Rio de Janeiro, Brasil.

- OJEU [Official Journal of the European Union], 2006. Directive 2006/118/EC of the European parliament and the council of 12 December 2006 on the protection of groundwater against pollution and deterioration. Official Journal of the European Union, L 372/19-L 372/31.
- Oliveira, J. T.; Pereira, E.; Ramalho, M.; Antunes, M. T.; Monteiro, J. H., Coords, 1992. Carta Geológica de Portugal à escala 1/500 000. 5ª Ed., 2 folhas. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- Parasnis, D. S., 1972. Principles of Applied Geophysics. Chapman and Hall, London. Second edition.
- Payne, B, 1983. Introduction. *in*: Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology. International Atomic Energy Agency. Technical Reports Series nº 91, pp.1-18. Vienna.
- Pedrosa, Y., Coord., 1998. Carta Hidrogeológica de Portugal à escala de 1/200 000. Folha 1. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.
- Pereira Cabral, F. A. V., 1883-1887. Traces d'actions glaciaires dans la Serra d'Estrela. Rochas striées, blocs erratiques, morianes. Commun. Commiss. Trab. Geol. Portugal, Lisboa, 1: 189-210.
- Pereira Netto, A. D.; Moreira, J. C.; Dias, A. E. X. O.; Arbilla, G.; Ferreira, L. F. V.; Oliveira, A. S.; Barek, J., 2000. Avaliação da contaminação humana por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos HPAs) e seus derivados nitrados (NPHAs): uma revisão metodológica. Quim Nova; 23(6):765-73.
- Plata Bedmar, A., 1994. Composición isotópica de las precipitaciones y aguas subteráneas de la Península Ibérica. *in*: Carreira, P. M.; Monge Soares, A. M.; Valério, P.; Araújo, M. F.; Barbosa, T., 2003. Teores em trítio nas águas de precipitação em Portugal Continental: variabilidade e fatores condicionantes. pp. 315-329. Memórias e Notícias, nº 2. Publ. do Dep. Ciên. Terra e do Mus. Mineral. Geol. Universidade de Coimbra.

- Porteous, A., 2000. Dictionary of Environmental Science and Technology. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 707 pp.
- Pulido, J. L., 1978. Hidrogeoquímica prática, 314 pp. Ed. Urmo, SA, Bilbao.
- Rasa, K.; Peltovuoria, T.; Hartikainen, H., 2006. Effects of de-icing chemicals sodium chloride and potassium formate on cadmium solubility in a coarse mineral soil. Science of the Total Environment, 2-3, 819-825.
- Ribeiro, A., 1984. Neotectonique du Portugal. in: Livro de Homenagem a Orlando Ribeiro, Vol. 1, 173-182. Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Ribeiro, A.; Conde, L.; Monteiro, J., 1972. Carta Tectónica de Portugal, escala 1/1 000 000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Ribeiro, A., 1988. A Tectónica Alpina em Portugal. Geonovas, Vol. Lisboa, 10: 8-11.
- Ribeiro, A.; Antunes, M. T.; Ferreira, M. P.; Rocha, R. B.; Soares, A. F.; Zbyszewski, G.; Almeida, F. M.; Carvalho, D.; Monteiro, J. H., 1979. Introduction à la géologie du Portugal, 114 pp. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Ribeiro, A.; Kullberg, M. C.; Kullberg, J. C.; Manuppella, G.; Phipps, S., 1990a. A review of Alpine tectonics in Portugal: Foreland detachment in basement and cover rocks, Tectonophysics, 184: 357-366.
- Ribeiro, A.; Quesada, C.; Dallmeyer, R. D., 1990b. Geodynamic evolution of the Iberian Massif. in: R. D. Dallmeyer & E. Martínez-García, Eds, Pre-Mesozoic Geology of Iberia, 397-410. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Ribeiro, J.; Silva, T.; Mendonça Filho, J. G.; Flores, D., 2012. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in burning and non-burning coal waste piles. Journal of Hazardous Materials, 199-200: 105-110.
- Ribeiro, O., 1949a. A Cova da Beira. Controvérsia de geomorfologia. Comum. Serv. Geol. Portugal, Lisboa, 30: 23-41.
- Ribeiro, O., 1949b. Le Portugal Central. Livret-Guide de l'excursion C. 16^e Congrès International de Géographie, Lisbonne.

- Ribeiro, O., 1954. Estrutura e relevo da Serra da Estrela. Bol. Real. Soc. Esp. Hist. Natur., Madrid., Tomo de Homenaje a E. Hernández-Pacheco, 549-566.
- Ribeiro, O., Lautensach, H.; Daveau, S., 1994. Geografia de Portugal. II O ritmo climático e a paisagem, 337-623. Ed. João Sá da Costa, Lisboa.
- Rodrigues, J. D.; Lobo-Ferreira, J. P.; Santos, J. B.; Mingéns, N., 1989. Caracterização sumária dos recursos hídricos subterrâneos de Portugal. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. Memória nº 735.
- Rodrigues, P. M. S. M.; Rodrigues, R. M. M.; Costa, B. H. F.; Tavares Martins, A. A. L.; Esteves da Silva, J. C. G, 2010. Multivariate analysis of the water quality variation in the Serra da Estrela (Portugal) Natural Park as a consequence of road deicing with salt. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 102: 130-135. Elsevier.
- Rogers, W. J., 2003. Encyclopedia of Water Science. Copyright© 2003 by Marcel Dekker, Inc.
- Rollin, C.; Quiot, F.; Denys, S.; Bureaus, J., 2005. Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques. *in*: LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil), 2009. Avaliação do Impacte de Fogos Florestais nos Recursos Hídricos Subterrâneos – Relatório Final de Execução Material. 565 pp. I & D Hidráulica e Ambiente. Lisboa.
- Rozanski, K; Gonfiantini, R.; Araguás-Araguás, L., 1991. Tritium in the global atmosphere: Distribution patterns and recent trends. Journal of Physics G: Nuclear Particle Physics, 17: 5523-5536.
- Rozanski, K.; Aráguas, L.; Gonfiantini, R., 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. Climatic Changes in Continental ISotopic Records. Am. Geophys. Union, Geophys. Monogr., vol. 78, American Geophysical Union, Washington, D. C. 36 pp.
- Sanders, L. L., 1998. A manual of field hydrogeology. 381 pp. Prentice Hall. New Jersey.

- Sant'Ovaia, H.; Olivier, P.; Ferreira, N.; Noronha, F., 2010. Magmatic structures and kinematics emplacement of the Variscan granites from Central Portugal (Serra da Estrela and Castro Daire areas). *Journal of Structural Geology*, 23: 1450-1465.
- Santos, F. D.; Forbes, K.; Moita, R., Eds, 2002. Climate change in Portugal – scenarios, impacts and adaptation measures, SIAM Project, 454 pp. Gradiva, Lisboa.
- Santos, F. D.; Miranda, P., Eds, 2006. Alterações climáticas em Portugal – cenários, impactos e medidas de remediação. Projecto SIAM II, 505 pp. Gradiva, Lisboa.
- Sasaki, Y., 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40: 453-464.
- Silva, J. P. S. G., *em preparação*. Efeito dos fogos florestais sobre propriedades dos solos e águas subterrâneas. Dissertação de Mestrado a apresentar à Universidade do Porto.
- Slooff, W.; Janus, J.A.; Matthijsen, A. J. C. M.; Montizaan, G. K.; Ros, J. P. M., (eds.), 1989. Integrated Criteria Document PAHs. 199 pp. National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM), Report 758474011. Buthoven, Netherlands.
- SNPRCN (Serviço Nacional de Parques, Reservas e Conservação da Natureza), 1987. Plano de ordenamento do Parque Natural da Serra da Estrela, Volumes 1-4. Lisboa.
- Statheropoulos, M.; Karma, S., 2007. Complexity and origin of the smoke components as measured near the flame-front of a real forest fire incident: A case of study. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 43, 115-123.
- Stone, W. J., 1999. Hydrogeology in practice, a guide to characterizing ground-water systems. 248 pp. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Stober, I.; Bucher, K., 1999. Origin of salinity of deep groundwater in crystallin rocks. *Terra Nova*, 11, 181-185.

- Struckmeier, W.; Rubin, Y.; Jones, J. A. A., 2005. Água Subterrânea – reservatório para um planeta com sede? Ciências da terra para a sociedade. in: www.yearofplanetearth.org.
- Teixeira, C, 1972. Carta Geológica de Portugal à escala 1/500 000, 4ª Ed., 2 folhas. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Teixeira, C.; Brito de Carvalho, L. H.; Barros, R. F.; Martins, J. A.; Haas, W. E. L.; Pilar, L.; Rocha, A. T., 1961. Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000. Notícia Explicativa da folha 17-C – Cantã CombaDão. 31 pp. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Teixeira, C.; Martins, J. Ávila; Medeiros, A. C.; Pilar, L.; Mesquita, L. P.; Ferro, M. N.; Fernandes, A. P.; Rocha, A., 1963a. Carta geológica de Portugal na escala de 1/50 000. Notícia Explicativa da folha 18-C – Guarda. 25 pp. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Teixeira, C.; Medeiros, A. C.; Pilar, L.; Carvalhosa, A.; Ferro, M. N.; Rocha, A. T., 1963b. Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000. Notícia explicativa da folha 18-A – Vila Franca das Naves. 27 pp. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Teixeira, C.; Brito de Carvalho, J. H.; Paula Santos, J.; Martins Peres, A.; Barros, R. F.; Pilar, L.; Fernandes, A. P.; Rocha, A. T., 1967. Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000. Notícia Explicativa da folha nº17-D – Gouveia. 28 pp. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Teixeira, C.; Paula Santos, J.; Carvalho, H. F.; Fernandes, A. Peinador & Vairinho, M. Margarida, 1974. Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000. Noticia Explicativa da folha 20-B – Covilhã. 52 pp. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

- Tellman, J. H.; Rivett, M. O.; Israfilov, R., 2006. Urban groundwater management and sustainability. NATO science series. Series IV, Earth and environmental sciences. Springer Edt.
- Todd, D. K.; 1980. Ground Water Hydrology. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Torres, A., 1930-1931. Rapports entre les sources d'eaux minérales et la géologie. in: Le Portugal Hydrologique, Vol. 1, 107-136.
- TRB (Transportation Research Board), 1991. Highway deicing, comparing salt and calcium magnesium acetate. Special Report 235, 163.
- Tronicke, J.; Holliger, K., 2005. Quantitative integration of hydrogeophysical data: conditional geostatistical simulation for characterizing heterogeneous alluvial aquifers. Geophysics 70 (3), H1–H10.
- USDA (United States Department of Agriculture), 2005. Wildland Fire in Ecosystems. Effect of Fire on Soil and Water. D. G. Neary, K. C. Ryan, L. F. DeBano. (Eds.).
- USGS (United States Geological Survey), 2010. Road Salt and Water Quality. Environmental Fact Sheet. New Hampshire Department of Environmental Services.
- U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries.
- Vasconcelos, P. C.; Artaxo, P. E.; Ciccioli, P.; Cecinato, A.; Brancaleoni, E.; Frattoni, M, 1998. Determinação dos Hidrocarbonetos Saturados e Policíclicos Aromáticos Presentes no Material Particulado da Atmosfera Amazônica. Química Nova, 21(4), 385-393.
- Veiga, N. M. S. A., 1999. Recherche hydrogéologique par méthodes géophysiques en terrains granitiques (région de Gouveia-Seia, Portugal), 312 pp. Faculté des Sciences de l'Université de Lausanne (Tese de Doutorado).
- Veludo, I., 2004. Monitorização da atividade sísmica no território do parque arqueológico do Vale do Côa. Relatório de Estágio. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Ventura, J.E., 1988. Temperaturas máximas e mínimas em Portugal Continental, L. A. G. F., Rel. nº 28, C. E. G.

- Vereecken, H.; Binley, A.; Cassiani, G.; Revil, A.; Titov, K., 2006. Applied Hydrogeophysics. IV. pp. 383. Earth and Environmental Sciences – Vol. 71. Edited by Springer.
- Vieira, G. T., 2004. Geomorfologia dos planaltos e altos vales da Serra da Estrela. Ambientes frios do Plistocénico Superior e dinâmica atual. 724 pp. 1 mapa. Universidade de Lisboa. (Dissertação de Doutoramento).
- Vieira, G. T.; Brum Ferreira, A., 1998. General characteristics of the glacial geomorphology of the Serra da Estrela. in: G. T. Vieira, Ed., Glacial and Periglacial Geomorphology of the Serra da Estrela. Guidebook for the field-trip, IGU Commission on Climate Change Periglacial Environments, 26-28 August 1998, 37-48. CEG and Department of Geography, University of Lisbon.
- Vieira, G. T.; Mora, C.; 1998. General characteristics of the climate of the Serra da Estrela. In: G. T. Vieira, Ed., Glacial and Periglacial Geomorphology of the Serra da Estrela. Guidebook for the field-trip, IGU Commission on Climate Change and Periglacial Environments, 26-28 August 1998, p.26-26. CEG and Department of Geography, University of Lisbon.
- Vieira, G. T.; Ramos, M., 2001. Monitoring of shallow soil temperatures in the Cântaro Raso (Serra da Estrela, Portugal). Data from winter of 1997/98, in: Livro de Homenagem (in honorium) Professor Doutor Gaspar Soares de Carvalho. 129-136. Braga.
- Vieira, G. T.; Mora, C.; Ramos, M., 2002. Observações acerca das temperaturas do ar e do solo na Serra da Estrela (Portugal). in: E. Serrano & Garcia, Eds, Periglacialismo en montaña y altas latitudes. 67-89. Departamento de Geografia da Universidade de Valladolid.
- Vieira, G.; Mora, C.; Ramos, M., 2003a. Ground temperature regimes and geomorphology, 52: 57-72.

- Vieira, G.; Jansen, J.; Ferreira, N., 2005. Environmental setting of the Parque Natural da Serra da Estrela. in: T. Pinto Correia, R. G. H. Bunce & D. C. Howard, Eds, Landscape ecology and mangment of Atlantic mountains, Landscape Ecology Series, IALE (Publication series number 2: 53-64).
- Viviroli, D., Weingartner R., 2008. "Water towers": a global view of the hydrological importance of mountains. In: E. Wiegandt (Ed.) Mountains: Sources of Water, Sources of Knowledge. Advances in Global Change Research, 31, 15-20.
- Viviroli, D.; Archer, D. R.; Buytaert, W.; Fowler, H. J.; Greenwood, G. B.; Hamlet, A. F.; Huang, Y.; Koboltschnig, G.; Litaor, M. I.; López-Moreno, J.I.; Lorentz, S.; Schädler, B.; Schwaiger, K.; Vuille, M.; Woods, R., 2010. Climate change and mountain water resources: overview and recommendations for research, management and politics. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 7, 2829-2895.
- WTC (Wisconsin Transportation Center), 1997. Using Salta and Sand for Winter Road Maintenance. Wisconsin Transportation Bulletin, U. S. Roads, 6.
- Yapp, C. J., 1982. A model for the relationships between precipitation d/H ratios and precipitation intensity. in: Rozanski, K.; Aráguas, L.; Gonfiantini, R., 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. Climatic Changes in Continental ISotopic Records. Am. Geophys. Union, Geophys. Monogr., vol. 78, American Geophysical Union, Washington, D. C. 36 pp.
- Yurtsever, Y.; Gat, J. R., 1981. Atmospheric waters. in: Stable Isotope Hydrology: Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle, edited by J. R. Gat and R. Gonfiantini, Technical Report Series, N° 210. 103-142. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Zbyszewsky, G.; Barreto de Faria, J. 1971. O sal-gema em Portugal metropolitano, suas jazidas características e aproveitamento. Estudos Notas e Trabalhos do Serviço de Fomento Mineiro. Vol. 20(1-2):5-105.

Zhou, B.; Cai, W.; Zou, L., 2003. Thermodynamic functions for transfer of anthracene from water to (water + alcohol) mixtures at 298.15 K, J. Chem. Eng. Data, 48(3):742-745.

Cartografia geológica e topográfica

Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000. Folha 17-D – Gouveia. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 1966.

Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000. Folha 18-C – Guarda. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 1963.

Carta Militar de Portugal na escala 1/25 000. Folha 212 (Seia). Instituto Geográfico do Exército, Ed. 2, Lisboa, 1993.

Carta Militar de Portugal na escala 1/25 000. Folha 213 (Manteigas). Instituto Geográfico do Exército, Ed. 3, Lisboa, 1998.

Carta Militar de Portugal na escala 1/25 000. Folha 223 (Loriga – Seia). Instituto Geográfico do Exército, Ed. 2, Lisboa, 1993.

Carta Militar de Portugal na escala 1/25 000. Folha 224 (Teixoso – Covilhã). Instituto Geográfico do Exército, Ed. 3, Lisboa, 1998.

Carta Militar de Portugal na escala 1/25 000. Folha 234 (Unhais da Serra – Covilhã). Instituto Geográfico do Exército, Ed. 2, Lisboa, 1993.

Carta Militar de Portugal na escala 1/25 000. Folha 235 (Covilhã). Instituto Geográfico do Exército, Ed. 2, Lisboa, 1993.

Páginas da Internet

IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera), 2010-2012. Boletins Climatológicos Anuais 2010, 2011 e 2012. www.ipma.pt., consultado em 20/01/2013.

IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera), 2013. Mapas e gráficos da precipitação em 2013.
<https://www.ipma.pt/pt/oclima/monitorizacao/index.jsp?selTipo=m&selVar=rr&selAno=-1>, consultado em 31/05/2013.

SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos), 2009. <http://snirh.pt/>, consultado em 30/06/2012.

Shimadzu do Brasil, 2013. www.shimadzu.com.br., consultado em 27/02/2013.

UFRRJ (Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro), 2013.
www.ufrrj.br/institutos/it/de/acidentes/c.htm., consultado em 15/04/2013.

UNESCO IHP-VI Programme: www.unesco.org., consultado em 10/01/2011.

University of Ottawa – Faculty of Science, 2013.
www.science.uottawa.ca/eih/ch7/7tritium.htm., consultado em 02/02/2013.



Anexo I

Inventário hidrogeológico

Inventário Hidrogeológico

Data: --/--/201-

Hora:--

Ficha nº 1	Designação: Fonte Santa	Tipo: Nascente
Cota: 670 metros	Carta topográfica: 235 (Covilhã) Escala: 1/25 000	Litologia da Bacia hidrogeológica: Granito de Seia
Coordenadas N 40° 16' 40,6'' W 7° 30' 50,5''	Carta geológica: 20B (Covilhã) Escala: 1/50 000	Ocupação do solo da bacia: Floresta de folhosas e resinosas
Tipo de nascente: <input checked="" type="checkbox"/> Permanente Temporária	Condições de acesso: acessível durante todo o estudo	
	Observações	
Emergência através de: <input checked="" type="checkbox"/> Tubo Rocha Solo Zona alagada	Geomorfologia: Planalto Encosta <input checked="" type="checkbox"/> Vale	Utilização: <input checked="" type="checkbox"/> Consumo humano Rega Pecuária
Características e propriedades da água		
Cheiro: inodora	Cor: incolor	Turbidez: água límpida
Parâmetros físico-químicos da água ^(*)		
Temperatura: 12,9 °C	Condutividade: 27 µS/cm	pH: 5,32
Documento fotográfico	Localização	
		

^(*) valores médios para todo o período de estudo

Inventário Hidrogeológico

Data: --/--/201-

Hora:--



Ficha nº 2	Designação: Fonte da Biquinha	Tipo: Nascente
Cota: 810 metros	Carta topográfica: 235 (Covilhã) Escala: 1/25 000	Litologia da Bacia hidrogeológica: Granito da Covilhã
Coordenadas N 40° 17' 05,1" W 7° 30' 58,1"	Carta geológica: 20B (Covilhã) Escala: 1/50 000	Ocupação do solo da bacia: Urzal e afloramentos rochosos
Tipo de nascente: <input checked="" type="checkbox"/> Permanente <input type="checkbox"/> Temporária	Condições de acesso: acessível durante todo o estudo	
	Observações	
Emergência através de: <input checked="" type="checkbox"/> Tubo <input checked="" type="checkbox"/> Rocha Solo Zona alagada	Geomorfologia: <input checked="" type="checkbox"/> Planalto Encosta Vale	Utilização: <input checked="" type="checkbox"/> Consumo humano <input checked="" type="checkbox"/> Rega Pecuária
Características e propriedades da água		
Cheiro: inodora	Cor: incolor	Turbidez: água límpida
Parâmetros físico-químicos da água(*)		
Temperatura: 13,7 °C	Condutividade: 31 µS/cm	pH: 5,06
Documento fotográfico	Localização	
		

(*) valores médios para todo o período de estudo

Inventário Hidrogeológico

Data: --/--/201-

Hora:--


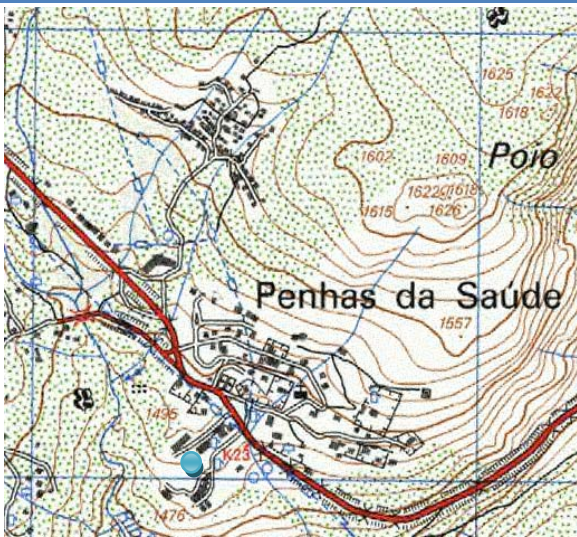
Ficha nº 3	Designação: Mina da Rosa Negra	Tipo: Mina de água
Cota: 950 metros	Carta topográfica: 235 (Covilhã) Escala: 1/25 000	Litologia da Bacia hidrogeológica: Granito da Covilhã
Coordenadas N 40° 17' 17,1" W 7° 31' 21,1"	Carta geológica: 20B (Covilhã) Escala: 1/50 000	Ocupação do solo da bacia: Floresta de folhosas e resinosas
Tipo de nascente: ✓ Permanente Temporária	Condições de acesso: acessível durante todo o estudo	
	Observações: potencial contaminação por sistema de águas residuais	
Emergência através de: ✓ Tubo Rocha Solo Zona alagada	Geomorfologia: Planalto Encosta ✓ Vale	Utilização: ✓ Consumo humano ✓ Rega Pecuária
Características e propriedades da água		
Cheiro: inodora	Cor: incolor	Turbidez: água límpida
Parâmetros físico-químicos da água ^(*)		
Temperatura: 12,4 °C	Condutividade: 26 µS/cm	pH: 5,58
Documento fotográfico	Localização	
		

(*) valores médios para todo o período de estudo

Inventário Hidrogeológico

Data: --/--/201-

Hora:--


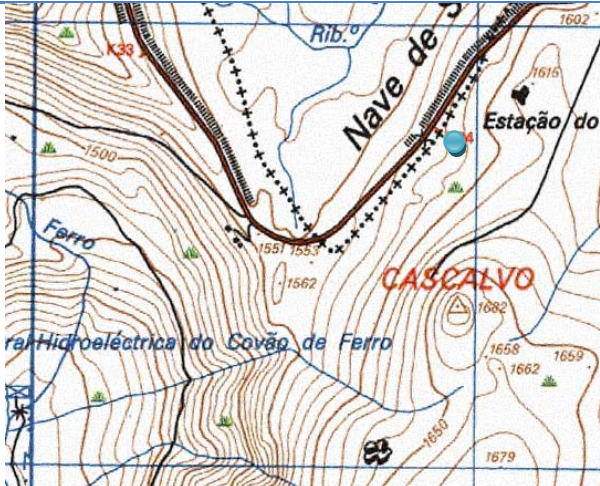
Ficha nº 4	Designação: Fonte das Penhas da Saúde	Tipo: Nascente
Cota: 148 metros	Carta topográfica: 224 (Teixoso – Covilhã) Escala: 1/25 000	Litologia da Bacia hidrogeológica: Granito da Covilhã
Coordenadas N 40° 18'33,2" W 7° 33' 13,3"	Carta geológica: 20B (Covilhã) Escala: 1/50 000	Ocupação do solo da bacia: Habitções, urzal
Tipo de nascente: <input checked="" type="checkbox"/> Permanente <input type="checkbox"/> Temporária	Condições de acesso: acessível durante todo o estudo	
	Observações	
Emergência através de: <input checked="" type="checkbox"/> Tubo Rocha Solo Zona alagada	Geomorfologia: <input checked="" type="checkbox"/> Planalto Encosta Vale	Utilização: <input checked="" type="checkbox"/> Consumo humano Rega Pecuária
Características e propriedades da água		
Cheiro: inodora	Cor: incolor	Turbidez: água límpida
Parâmetros físico-químicos da água ^(*)		
Temperatura: 12,2 °C	Condutividade: 21 µS/cm	pH: 5,14
Documento fotográfico	Localização	
		

^(*) valores médios para todo o período de estudo

Inventário Hidrogeológico

Data: --/--/201-

Hora:--


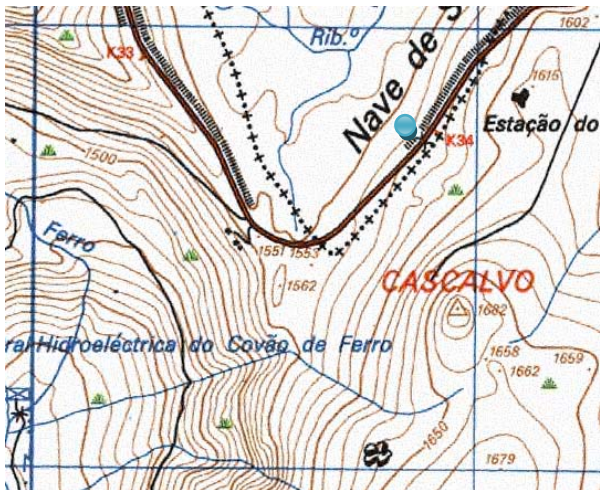
Ficha nº 5	Designação: Fonte da Saibreira		Tipo: Nascente
Cota: 1555 metros	Carta topográfica: 223 (Loriga – Seia) Escala: 1/25 000		Litologia da Bacia hidrogeológica: Granito da Estrela
Coordenadas N 40° 18' 47,3" W 7° 34' 45,5"	Carta geológica: 20B (Covilhã) Escala: 1/50 000		Ocupação do solo da bacia: Urzal, giesta
Tipo de nascente: <div style="display: flex; justify-content: space-between;"><div>✓ Permanente</div><div>Temporária</div></div>	Condições de acesso: acessível durante todo o estudo		
	Observações		
Emergência através de: Tubo Rocha Solo ✓ Zona alagada	Geomorfologia: ✓ Planalto Encosta Vale	Utilização: Consumo humano Rega Pecuária	
Características e propriedades da água			
Cheiro: inodora	Cor: incolor, amarelada/acastanhada, esverdeada	Turbidez: ligeiramente a bastante turva	
Parâmetros físico-químicos da água ^(*)			
Temperatura: 11,1 °C	Condutividade: 6 µS/cm	pH: 5,55	
Documento fotográfico		Localização	
			

^(*) valores médios para todo o período de estudo

Inventário Hidrogeológico

Data: --/--/201-

Hora:--

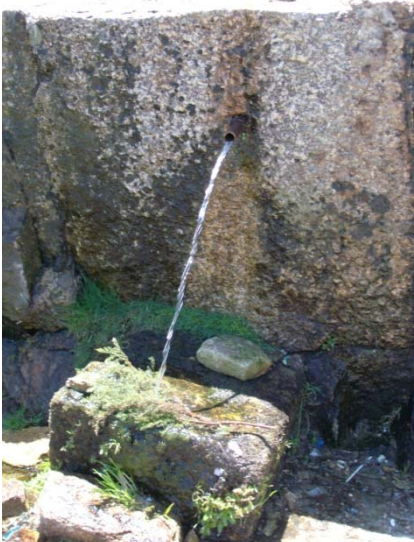
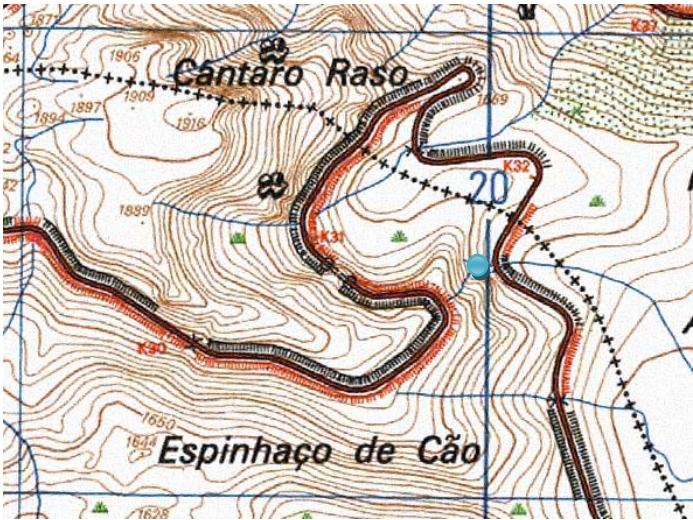
Ficha nº 6	Designação: Fonte da Nave de Santo António Sul	Tipo: Nascente
Cota: 1585 metros	Carta topográfica: 223 (Loriga – Seia) Escala: 1/25 000	Litologia da Bacia hidrogeológica: Depósitos glaciários e fluvioglaciários
Coordenadas N 40° 18' 49,8'' W 7° 34' 49,9''	Carta geológica: 20B (Covilhã) Escala: 1/50 000	Ocupação do solo da bacia: Urzal, giestal, estrada
Tipo de nascente: ✓ Permanente Temporária	Condições de acesso: acessível durante todo o estudo	
	Observações	
Emergência através de: ✓ Tubo Rocha Solo Zona alagada	Geomorfologia: ✓ Planalto Encosta Vale	Utilização: Consumo humano Rega ✓ Pecuária
Características e propriedades da água		
Cheiro: inodora	Cor: incolor	Turbidez: água límpida
Parâmetros físico-químicos da água ^(*)		
Temperatura: 8,6 °C	Condutividade: 39 µS/cm	pH: 5,89
Documento fotográfico	Localização	
		

^(*) valores médios para todo o período de estudo

Inventário Hidrogeológico

Data: --/--/201-

Hora:--



Ficha nº 7	Designação: Fonte do Espinhaço de Cão	Tipo: Nascente
Cota: 1625 metros	Carta topográfica: 223 (Loriga – Seia) Escala: 1/25 000	Litologia da Bacia hidrogeológica: Granito da Covilhã
Coordenadas N 40° 19' 13,2'' W 7° 35' 20,8''	Carta geológica: 20B (Covilhã) Escala: 1/50 000	Ocupação do solo da bacia: Urzal, afloramentos rochosos
Tipo de nascente: ✓ Permanente Temporária	Condições de acesso: acessível durante todo o estudo	
	Observações:	
Emergência através de: ✓ Tubo ✓ Rocha Solo Zona alagada	Geomorfologia: Planalto ✓ Encosta Vale	Utilização: ✓ Consumo humano Rega Pecuária
Características e propriedades da água		
Cheiro: inodora	Cor: incolor	Turbidez: água límpida
Parâmetros físico-químicos da água ^(*)		
Temperatura: 9,9 °C	Condutividade: 287 µS/cm	pH: 6,13
Documento fotográfico	Localização	
		

^(*) valores médios para todo o período de estudo

Inventário Hidrogeológico

Data: --/--/201-

Hora:--



Ficha nº 8	Designação: Fonte do Covão do Boi	Tipo: Nascente
Cota: 1850 metros	Carta topográfica: 223 (Loriga – Seia) Escala: 1/25 000	Litologia da Bacia hidrogeológica: Granito da Covilhã
Coordenadas N 40° 19' 23,6" W 7° 36' 11,3"	Carta geológica: 20B (Covilhã) Escala: 1/50 000	Ocupação do solo da bacia: Urzal, afloramentos rochosos
Tipo de nascente: ✓ Permanente Temporária	Condições de acesso: acessível durante todo o estudo	
	Observações:	
Emergência através de: ✓ Tubo ✓ Rocha Solo Zona alagada	Geomorfologia: Planalto ✓ Encosta Vale	Utilização: ✓ Consumo humano Rega Pecuária
Características e propriedades da água		
Cheiro: inodora	Cor: incolor	Turbidez: água límpida
Parâmetros físico-químicos da água ^(*)		
Temperatura: 10,3 °C	Condutividade: 11 µS/cm	pH: 6,12
Documento fotográfico	Localização	
		

^(*) valores médios para todo o período de estudo

Inventário Hidrogeológico

Data: --/--/201-

Hora:--

Ficha nº 9	Designação: Mina da Torre	Tipo: Mina de água
Cota: 1990 metros	Carta topográfica: 223 (Loriga – Seia) Escala: 1/25 000	Litologia da Bacia hidrogeológica: Granito da Estrela
Coordenadas N 40° 19'15,4" W 7° 36' 55,6"	Carta geológica: 20B (Covilhã) Escala: 1/50 000	Ocupação do solo da bacia: Afloramentos rochosos, área urbanizada, estradas
Tipo de nascente: ✓ Permanente Temporária	Condições de acesso: acessível durante todo o estudo	
	Observações: colheita de água de um reservatório	
Emergência através de: Tubo Rocha Solo Zona alagada	Geomorfologia: ✓ Planalto Encosta Vale	Utilização: Consumo humano Rega Pecuária
Características e propriedades da água		
Cheiro: inodora	Cor: incolor	Turbidez: água límpida
Parâmetros físico-químicos da água(*)		
Temperatura: 9,1 °C	Condutividade: 454 µS/cm	pH: 6,05
Documento fotográfico	Localização	
		

(*) valores médios para todo o período de estudo

Inventário Hidrogeológico

Data: --/--/201-

Hora:--

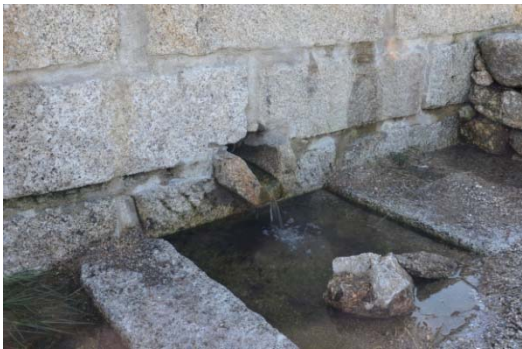

Ficha nº 10	Designação: Fonte dos Perús	Tipo: Nascente
Cota: 1840 metros	Carta topográfica: 223 (Loriga – Seia) Escala: 1/25 000	Litologia da Bacia hidrogeológica: Granito da Estrela
Coordenadas N 40° 20'30,6" W 7° 37' 20,1"	Carta geológica: 20B (Covilhã) Escala: 1/50 000	Ocupação do solo da bacia: Cervunal
Tipo de nascente: ✓ Permanente Temporária	Condições de acesso: acessível durante todo o estudo	
	Observações	
Emergência através de: Tubo Rocha ✓ Solo ✓ Zona alagada	Geomorfologia: ✓ Planalto Encosta Vale	Utilização: Consumo humano Rega Pecuária
Características e propriedades da água		
Cheiro: inodora	Cor: incolor, amarela/acastanhada	Turbidez: água límpida a ligeiramente turva
Parâmetros físico-químicos da água ^(*)		
Temperatura: 9,1 °C	Condutividade: 7 µS/cm	pH: 5,35
Documento fotográfico	Localização	
		

^(*) valores médios para todo o período de estudo

Inventário Hidrogeológico

Data: --/--/201-

Hora:--


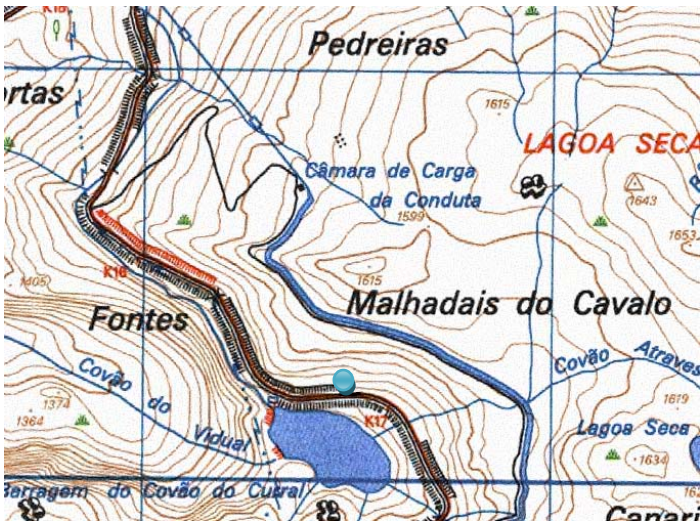
Ficha nº 11	Designação: Nascente da Lago Comprida	Tipo: Nascente
Cota: 1595 metros	Carta topográfica: 223 (Loriga – Seia) Escala: 1/25 000	Litologia da Bacia hidrogeológica: Granito de Seia
Coordenadas N 40° 21'30,7" W 7° 39' 19,2"	Carta geológica: 20B (Covilhã) Escala: 1/50 000	Ocupação do solo da bacia: Urzal, giestal, cervunal, estrada
Tipo de nascente: ✓ Permanente Temporária	Condições de acesso: acessível durante todo o estudo	
	Observações	
Emergência através de: ✓ Tubo Rocha Solo Zona alagada	Geomorfologia: ✓ Planalto Encosta Vale	Utilização: Consumo humano Rega Pecuária
Características e propriedades da água		
Cheiro: inodora	Cor: incolor	Turbidez: água límpida
Parâmetros físico-químicos da água ^(*)		
Temperatura: 8,6 °C	Condutividade: 123 µS/cm	pH: 5,25
Documento fotográfico	Localização	
		

^(*) valores médios para todo o período de estudo

Inventário Hidrogeológico

Data: --/--/201-

Hora:--



Ficha nº 12	Designação: Fonte do Covão do Curral	Tipo: Nascente
Cota: 1500 metros	Carta topográfica: 223 (Loriga – Seia) Escala: 1/25 000	Litologia da Bacia hidrogeológica: Granito do covão do Curral
Coordenadas N 40° 22' 21,0" W 7° 38' 25,2"	Carta geológica: 20B (Covilhã) Escala: 1/50 000	Ocupação do solo da bacia: Urzal, giestal
Tipo de nascente: ✓ Permanente Temporária	Condições de acesso: acessível durante todo o estudo	
	Observações	
Emergência através de: Tubo ✓ Rocha Solo Zona alagada	Geomorfologia: Planalto ✓ Encosta Vale	Utilização: Consumo humano Rega Pecuária
Características e propriedades da água		
Cheiro: inodora	Cor: incolor, amarelada, acastanhada	Turbidez: água límpida a muito turva
Parâmetros físico-químicos da água ^(*)		
Temperatura: 12,7 °C	Condutividade: 15 µS/cm	pH: 6,62
Documento fotográfico	Localização	
		

^(*) valores médios para todo o período de estudo

Inventário Hidrogeológico

Data: --/--/201-

Hora:--



Ficha nº 13	Designação: Fonte do Ferreiro	Tipo: Mina de água
Cota: 1050 metros	Carta topográfica: 212 (Seia) Escala: 1/25 000	Litologia da Bacia hidrogeológica: Granito de Seia
Coordenadas N 40° 24'09,2" W 7° 38' 23,8"	Carta geológica: 17D (Gouveia) Escala: 1/50 000	Ocupação do solo da bacia: área agrícola em socalcos
Tipo de nascente: <input checked="" type="checkbox"/> Permanente Temporária	Condições de acesso: acessível durante todo o estudo	
	Observações	
Emergência através de: <input checked="" type="checkbox"/> Tubo Rocha Solo Zona alagada	Geomorfologia: Planalto Encosta <input checked="" type="checkbox"/> Vale	Utilização: <input checked="" type="checkbox"/> Consumo humano <input checked="" type="checkbox"/> Rega <input checked="" type="checkbox"/> Pecuária
Características e propriedades da água		
Cheiro: inodora	Cor: incolor	Turbidez: água límpida
Parâmetros físico-químicos da água ^(*)		
Temperatura: 13,2 °C	Condutividade: 49 µS/cm	pH: 5,68
Documento fotográfico	Localização	
		

(*) valores médios para todo o período de estudo

Inventário Hidrogeológico

Data: --/--/201-

Hora:--


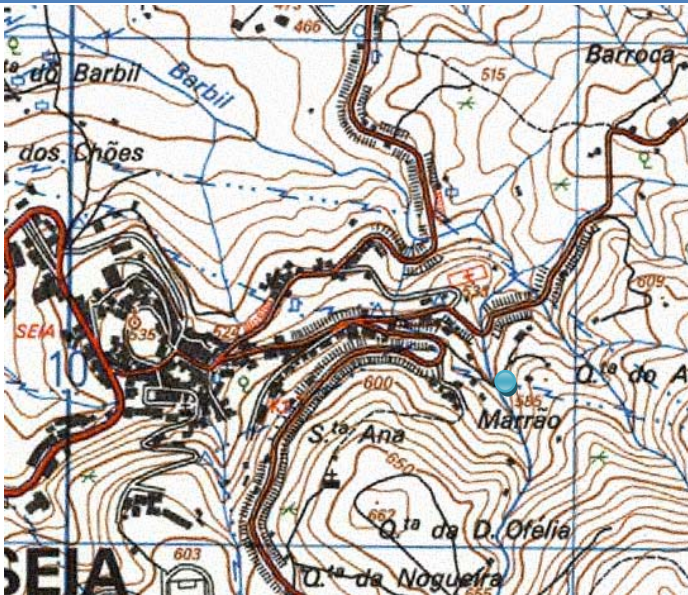
Ficha nº 14	Designação: Fonte de S. Tomé	Tipo: Mina de água
Cota: 810 metros	Carta topográfica: 212 (Seia) Escala: 1/25 000	Litologia da Bacia hidrogeológica: Granito de Seia
Coordenadas N 40° 25' 01,9" W 7° 41' 05,1"	Carta geológica: 17D (Gouveia) Escala: 1/50 000	Ocupação do solo da bacia: floresta de folhosas
Tipo de nascente: ✓ Permanente Temporária	Condições de acesso: acessível durante todo o estudo	
	Observações	
Emergência através de: ✓ Tubo Rocha Solo Zona alagada	Geomorfologia: Planalto ✓ Encosta Vale	Utilização: ✓ Consumo humano ✓ Rega ✓ Pecuária
Características e propriedades da água		
Cheiro: inodora	Cor: incolor	Turbidez: água límpida
Parâmetros físico-químicos da água ^(*)		
Temperatura: 13,1 °C	Condutividade: 49 µS/cm	pH: 5,82
Documento fotográfico	Localização	
		

(*) valores médios para todo o período de estudo

Inventário Hidrogeológico

Data: --/--/201-

Hora:--

Ficha nº 15	Designação: Fonte do Marrão	Tipo: Mina de água
Cota: 565 metros	Carta topográfica: 212 (Seia) Escala: 1/25 000	Litologia da Bacia hidrogeológica: Granito de Seia
Coordenadas N 40° 25'09,0" W 7° 41' 41,3"	Carta geológica: 17D (Gouveia) Escala: 1/50 000	Ocupação do solo da bacia: área agrícola em socalcos
Tipo de nascente: <input checked="" type="checkbox"/> Permanente Temporária	Condições de acesso: acessível durante todo o estudo	
	Observações	
Emergência através de: <input checked="" type="checkbox"/> Tubo Rocha Solo Zona alagada	Geomorfologia: Planalto Encosta <input checked="" type="checkbox"/> Vale	Utilização: <input checked="" type="checkbox"/> Consumo humano <input checked="" type="checkbox"/> Rega <input checked="" type="checkbox"/> Pecuária
Características e propriedades da água		
Cheiro: inodora	Cor: incolor	Turbidez: água límpida
Parâmetros físico-químicos da água ^(*)		
Temperatura: 13,9 °C	Condutividade: 58 µS/cm	pH: 6,12
Documento fotográfico	Localização	
		

^(*) valores médios para todo o período de estudo

Anexo II

Valores de temperatura, pH e condutividade elétrica da água medidos *in situ*

Campanha de Maio de 2010			
Ponto de amostragem	Temperatura da água (°C)	pH	Condutividade elétrica (μS/cm)
Fonte Santa	12,8	4,86	17
Fonte da Biquinha	12,8	4,74	18
Mina da Rosa Negra	13,1	4,94	17
Fonte das Penhas da Saúde	12,2	4,77	14
Fonte da Saibreira	11,4	5,21	3
Fonte da Nave de Santo António Sul	8,3	5,43	30
Fonte do Espinhaço de Cão	10,4	5,76	334
Fonte do Covão do Boi	12,5	5,35	6
Mina da Torre	11,6	6,24	297
Fonte dos Perús	10,5	5,41	3
Nascente da Lagoa Comprida	8,4	5,26	85
Fonte do Covão do Curral	11,8	6,87	8
Fonte do Ferreiro	15,3	5,63	69
Fonte de S. Tomé	12,8	5,29	63
Fonte do Marrão	13,4	5,72	75

Campanha de Setembro de 2010			
Ponto de amostragem	Temperatura da água (°C)	pH	Condutividade elétrica (μS/cm)
Fonte Santa	13,2	5,93	25
Fonte da Biquinha	14,5	5,34	48
Mina da Rosa Negra	12,7	6,20	21
Fonte das Penhas da Saúde	15,5	5,40	20
Fonte da Saibreira	13,3	5,18	5
Fonte da Nave de Santo António Sul	9,6	6,22	38
Fonte do Espinhaço de Cão	12,3	7,08	246
Fonte do Covão do Boi	11,5	6,17	10
Mina da Torre	11,8	6,25	618
Fonte dos Perús	9,7	5,47	7
Nascente da Lagoa Comprida	10,3	5,38	159
Fonte do Covão do Curral	15,9	6,85	47
Fonte do Ferreiro	13,2	5,94	43
Fonte de S. Tomé	12,6	5,86	30
Fonte do Marrão	14,8	6,30	57

Campanha de Dezembro de 2010			
Ponto de amostragem	Temperatura da água (°C)	pH	Condutividade elétrica (µS/cm)
Fonte Santa	12,6	5,15	17
Fonte da Biquinha	12,6	4,97	21
Mina da Rosa Negra	11,5	5,75	16
Fonte das Penhas da Saúde	9,6	5,07	17
Fonte da Saibreira	7,7	5,49	3
Fonte da Nave de Santo António Sul	8,2	5,80	37
Fonte do Espinhaço de Cão	6,0	5,86	265
Fonte do Covão do Boi	5,3	5,85	6
Mina da Torre	3,1	6,42	302
Fonte dos Perús	7,0	5,29	3
Nascente da Lagoa Comprida	6,3	5,25	86
Fonte do Covão do Curral	6,1	6,02	12
Fonte do Ferreiro	11,3	5,48	51
Fonte de S. Tomé	10,8	5,37	75
Fonte do Marrão	11,6	5,81	54

Campanha de Abril de 2011			
Ponto de amostragem	Temperatura da água (°C)	pH	Condutividade elétrica (μS/cm)
Fonte Santa	13,2	5,17	18
Fonte da Biquinha	13,0	4,77	21
Mina da Rosa Negra	12,1	5,28	22
Fonte das Penhas da Saúde	9,2	4,84	15
Fonte da Saibreira	13,0	5,15	3
Fonte da Nave de Santo António Sul	8,3	5,69	47
Fonte do Espinhaço de Cão	7,6	5,88	363
Fonte do Covão do Boi	8,3	6,10	5
Mina da Torre	4,5	6,49	233
Fonte dos Perús	10,0	5,63	5
Nascente da Lagoa Comprida	6,7	5,51	71
Fonte do Covão do Curral	11,3	6,42	7
Fonte do Ferreiro	13,3	5,44	46
Fonte de S. Tomé	14,2	6,57	51
Fonte do Marrão	14,5	6,78	53

Campanha de Junho de 2011			
Ponto de amostragem	Temperatura da água (°C)	pH	Condutividade elétrica (μS/cm)
Fonte Santa	12,8	5,36	32
Fonte da Biquinha	12,8	4,86	33
Mina da Rosa Negra	12,3	5,14	28
Fonte das Penhas da Saúde	12,5	5,14	29
Fonte da Saibreira	10,2	5,78	6
Fonte da Nave de Santo António Sul	7,9	5,74	35
Fonte do Espinhaço de Cão	11,0	5,87	295
Fonte do Covão do Boi	12,4	6,08	9
Mina da Torre	11,9	5,60	439
Fonte dos Perú's	9,8	5,68	4
Nascente da Lagoa Comprida	9,6	4,68	127
Fonte do Covão do Curral	16,0	6,66	12
Fonte do Ferreiro	13,2	5,33	39
Fonte de S. Tomé	12,9	5,87	37
Fonte do Marrão	14,0	5,80	54

Campanha de Setembro de 2011			
Ponto de amostragem	Temperatura da água (°C)	pH	Condutividade elétrica (µS/cm)
Fonte Santa	13,2	5,45	20
Fonte da Biquinha	15,9	5,19	24
Mina da Rosa Negra	13,4	5,36	19
Fonte das Penhas da Saúde	14,0	5,19	17
Fonte da Saibreira	11,8	5,61	6
Fonte da Nave de Santo António Sul	10,2	5,69	30
Fonte do Espinhaço de Cão	12,4	6,17	252
Fonte do Covão do Boi	12,2	6,00	7
Mina da Torre	13,0	6,07	585
Fonte dos Perú	10,2	5,13	6
Nascente da Lagoa Comprida	12,2	4,88	118
Fonte do Covão do Curral	16,6	6,60	6
Fonte do Ferreiro	14,4	5,74	34
Fonte de S. Tomé	14,2	5,64	27
Fonte do Marrão	16,0	5,95	48

Campanha de Dezembro de 2011			
Ponto de amostragem	Temperatura da água (°C)	pH	Condutividade elétrica (µS/cm)
Fonte Santa	11,3	5,18	29
Fonte da Biquinha	11,8	5,15	31
Mina da Rosa Negra	10,7	6,12	30
Fonte das Penhas da Saúde	8,3	5,21	20
Fonte da Saibreira	5,3	6,04	10
Fonte da Nave de Santo António Sul	6,1	6,35	38
Fonte do Espinhaço de Cão	5,4	6,35	306
Fonte do Covão do Boi	2,8	6,77	18
Mina da Torre	1,4	6,63	345
Fonte dos Perúz	5,1	5,09	5
Nascente da Lagoa Comprida	4,7	5,52	76
Fonte do Covão do Curral	5,6	6,82	12
Fonte do Ferreiro	11,5	5,85	55
Fonte de S. Tomé	12,0	5,70	51
Fonte do Marrão	11,6	6,31	60

Campanha de Julho de 2012			
Ponto de amostragem	Temperatura da água (°C)	pH	Condutividade elétrica (μS/cm)
Fonte Santa	13,8	5,49	57
Fonte da Biquinha	15,9	5,48	52
Mina da Rosa Negra	13,0	5,82	51
Fonte das Penhas da Saúde	16,6	5,49	38
Fonte da Saibreira	15,7	5,92	15
Fonte da Nave de Santo António Sul	10,4	6,18	55
Fonte do Espinhaço de Cão	13,8	6,13	334
Fonte do Covão do Boi	17,6	6,66	30
Mina da Torre	15,3	5,67	814
Fonte dos Perús	10,1	5,14	25
Nascente da Lagoa Comprida	10,8	5,17	259
Fonte do Covão do Curral	18,1	6,73	15
Fonte do Ferreiro	13,7	6,04	58
Fonte de S. Tomé	15,0	6,25	54
Fonte do Marrão	15,2	6,31	61

Anexo III

Resultados das análises hidrogeoquímicas

Campanha de Maio de 2010								
Ponto de amostragem	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)
Fonte Santa	6,5	0,4	0,9	0,4	7	3,3	4,7	9,5
Fonte da Biquinha	7	0,3	0,9	0,4	3,66	3,1	7,3	6,8
Mina da Rosa Negra	6,9	0,7	0,9	0,4	4,88	2,4	7,4	8,1
Fonte das Penhas da Saúde	5,6	0,3	0,9	0,4	3,66	3,2	5,4	3,49
Fonte da Saibreira	5,6	0,2	0,3	0	3,66	2,2	3,5	6,1
Fonte da Nave de Santo António Sul	10,5	0,5	0,9	0,2	2,4	2,3	14,2	5,4
Fonte do Espinhaço de Cão	40	1,2	24	3,2	3,66	2,8	105	15,8
Fonte do Covão do Boi	5,4	0,2	0,7	0	3,66	2,7	3,7	8,3
Mina da Torre	48	1	18	0,6	28	6,2	83	1,752
Fonte dos Perús	4,5	0,2	0,3	0	3,66	2,2	3,4	2,261
Nascente da Lagoa Comprida	20	0,6	1,1	0,3	3,66	3,3	27,9	2,833
Fonte do Covão do Curral	5,8	0,3	0,9	0,2	3,66	2,7	4,5	6,3
Fonte do Ferreiro	8,9	3,4	2,8	0,9	3,66	4,4	9,1	11,3
Fonte de S. Tomé	9,8	2,6	1,9	0,3	3	5,7	10,1	9,9
Fonte do Marrão	10	1,3	3,2	1,1	7	7,4	9,9	14,7

Campanha de Setembro de 2010								
Ponto de amostragem	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)
Fonte Santa	3,5	0,4	1,4	0,3	9	1,8	2,5	11,3
Fonte da Biquinha	3,7	0,3	1,4	0,3	9	1,3	4,3	8,5
Mina da Rosa Negra	3,9	0,5	0,8	0,2	7	0	4,9	8,5
Fonte das Penhas da Saúde	2,5	0,3	1,9	0,3	5	0,8	3,1	5
Fonte da Saibreira	1,7	0,2	0,3	0	4	0	1,2	6,6
Fonte da Nave de Santo António Sul	7,4	0,3	0,7	0,1	5	0,3	11,5	7,1
Fonte do Espinhaço de Cão	19	0,7	21	2,7	6	0,5	73	20
Fonte do Covão do Boi	2,3	0,2	0,8	0,1	6	0,4	1,2	11,7
Mina da Torre	94	1,5	27	1,4	19	7,7	172	5,4
Fonte dos Perús	2	0,2	0,6	0,1	4	0,4	2,4	3
Nascente da Lagoa Comprida	26	0,3	3,1	0,7	4	1,1	46	4,8
Fonte do Covão do Curral	3,7	0,8	4,2	0,9	5	13,9	4	10,7
Fonte do Ferreiro	4,5	2	2,1	0,6	5	2,1	5,2	11
Fonte de S. Tomé	4,7	1,1	1,3	0,4	5	2,7	4,9	10,4
Fonte do Marrão	7,1	0,8	2,6	1,1	5	4,8	7,2	14,9

Campanha de Dezembro de 2010								
Ponto de amostragem	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)
Fonte Santa	3,2	0,9	0,9	0,9	4	3,9	3,9	10,3
Fonte da Biquinha	3,6	0,8	1	0,4	3	3,8	7,8	7,6
Mina da Rosa Negra	3,7	0,9	0,8	0,4	5	3,3	4,3	9,7
Fonte das Penhas da Saúde	2,2	0,8	1,2	0,4	3	3,5	4,3	5,3
Fonte da Saibreira	1,6	0,7	0,2	0,3	2	3,3	3,2	7
Fonte da Nave de Santo António Sul	8,2	0,7	0,8	0,3	4	3,1	12,8	7,4
Fonte do Espinhaço de Cão	26	1,1	18	2,3	5	3,4	82	16,8
Fonte do Covão do Boi	2,3	0,8	1,2	0,3	5	6,1	3,7	9,2
Mina da Torre	38	1,1	11,5	0,6	17	7,2	66	3,1
Fonte dos Perús	1,6	0,7	0,4	0,3	2	3,4	2,8	4,3
Nascente da Lagoa Comprida	14,8	0,8	1,8	0,5	2	4,1	26,6	4,5
Fonte do Covão do Curral	2	0,8	1,2	0,4	3	4,7	3,9	7
Fonte do Ferreiro	4,9	2,9	2,6	0,8	4	4,6	9,2	13
Fonte de S. Tomé	8,9	2,5	2,1	0,9	2	5,5	12,6	11,6
Fonte do Marrão	6,7	1,1	3	1	7	8,5	9,2	15,5

Campanha de Abril de 2011								
Ponto de amostragem	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)
Fonte Santa	3,1	0,6	1,3	0,3	7	1,3	2,3	10
Fonte da Biquinha	4	0,6	1,4	0,3	5	1	5,8	7,4
Mina da Rosa Negra	4	1	1,4	0,3	6	0,2	4,9	9
Fonte das Penhas da Saúde	2	0,6	1,6	0,2	4	0,7	2,6	4,4
Fonte da Saibreira	1,6	0,6	0,6	0,1	4	0,2	1	6,1
Fonte da Nave de Santo António Sul	9,6	0,6	0,9	0,1	4	0,3	14,4	6,8
Fonte do Espinhaço de Cão	41	1,1	26	2,9	4	0,8	112	15
Fonte do Covão do Boi	2	0,5	1	0,1	5	0,6	1,5	7,8
Mina da Torre	39	1	11,4	0,5	29	4,4	62	2,6
Fonte dos Perús	1	0,5	0,4	0,1	1	0,3	1,1	2,1
Nascente da Lagoa Comprida	13,7	0,6	1,8	0,3	1	1,3	22,2	3,6
Fonte do Covão do Curral	2	0,6	1	0,2	3	1,2	1,9	7,7
Fonte do Ferreiro	4,7	3,1	2,9	0,7	4	2,3	5,6	12
Fonte de S. Tomé	7,1	2,6	1,8	0,6	4	3,4	8	11
Fonte do Marrão	7,1	1,2	2,8	1,2	7	4,4	6,3	15

Campanha de Junho de 2011								
Ponto de amostragem	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)
Fonte Santa	2,5	0,9	1,3	0,6	4	1,5	1,3	12
Fonte da Biquinha	4,6	0,9	1,2	0,7	4	0,8	5,4	8,9
Mina da Rosa Negra	4,9	1,3	0,9	0,6	4	0,2	5,7	10
Fonte das Penhas da Saúde	2,9	0,9	1,7	0,6	4	0,8	2,7	5,4
Fonte da Saibreira	2,4	0,8	0,5	0,4	6	0,3	1	7,7
Fonte da Nave de Santo António Sul	7,5	0,8	0,6	0,4	4	0,5	9,5	7
Fonte do Espinhaço de Cão	30	1,3	27	3,6	4	0,7	92	18
Fonte do Covão do Boi	2,9	0,7	0,9	0,5	6	0,6	1,2	11
Mina da Torre	71	1,9	20	1,3	20	7,6	115	4,4
Fonte dos Perús	2	0,7	0,5	0,4	3	0,5	1,5	3,5
Nascente da Lagoa Comprida	21	0,9	2,5	0,8	3	1	34	5,1
Fonte do Covão do Curral	3,1	0,9	0,9	0,5	4	1,1	1,9	7,2
Fonte do Ferreiro	5,2	2,8	2,3	0,9	4	2,2	5	12
Fonte de S. Tomé	5,8	2	1,2	0,8	4	2,7	5,4	11
Fonte do Marrão	7,6	1,4	2,7	1,4	8	5,3	6	15

Campanha de Setembro de 2011								
Ponto de amostragem	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)
Fonte Santa	3,4	0,8	1,6	0,4	4	1,8	2,4	12
Fonte da Biquinha	3,8	0,8	1,5	0,4	6	1,3	4,8	10
Mina da Rosa Negra	4,1	1,1	1,2	0,4	6	0,3	5,5	9,3
Fonte das Penhas da Saúde	2,4	0,7	1,7	0,4	6	0,9	2,8	5,9
Fonte da Saibreira	1,8	0,8	0,7	0,2	4	0,2	1,1	7,2
Fonte da Nave de Santo António Sul	7,2	0,7	1	0,3	4	0,6	10,5	8,2
Fonte do Espinhaço de Cão	19,9	1,1	22	3,1	4	0,8	77	19
Fonte do Covão do Boi	2,3	0,6	1,1	0,3	6	0,5	1,3	12
Mina da Torre	96	1,9	25	1,3	20	8,1	171	6,2
Fonte dos Perús	1,7	0,7	0,8	0,3	5	0,6	1,6	4,4
Nascente da Lagoa Comprida	22,5	0,8	2,8	0,7	2	1,3	39	6,5
Fonte do Covão do Curral	2,4	0,7	1	0,3	2	0,7	1,4	8,3
Fonte do Ferreiro	4,4	2,4	2,2	0,7	6	2,3	4,5	6,2
Fonte de S. Tomé	4,6	1,6	1,4	0,5	4	2,2	4,8	11
Fonte do Marrão	6,7	1,3	2,4	1	4	5,4	6,1	16

Campanha de Dezembro de 2011								
Ponto de amostragem	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)
Fonte Santa	3,3	0,6	1,4	0,4	5	1,3	2,4	11
Fonte da Biquinha	3,7	0,5	1,4	0,4	5	0,8	4,7	8
Mina da Rosa Negra	4,1	0,8	1,1	0,4	5	0,1	5,2	9,4
Fonte das Penhas da Saúde	1,9	0,4	1,4	0,3	3	0,6	2,4	4,3
Fonte da Saibreira	1,5	0,4	0,5	0,2	3	0	1	6,3
Fonte da Nave de Santo António Sul	6	0,4	0,6	0,2	3	0,3	7,6	6,4
Fonte do Espinhaço de Cão	22,4	0,8	17,9	2,4	4	0,7	66	14
Fonte do Covão do Boi	2,3	0,5	1,1	0,3	4	0,3	1,4	8,8
Mina da Torre	48	0,4	11,3	0,6	21	6,3	66	2,8
Fonte dos Perús	1,4	0	0,5	0,3	2	0,4	1,9	3,9
Nascente da Lagoa Comprida	11	0,3	1,3	0,4	2	1,4	17,4	3,5
Fonte do Covão do Curral	2,2	0,3	0,9	0,3	3	0,8	2,1	6,7
Fonte do Ferreiro	9,1	4,7	2,5	2,4	3	2,2	4,8	12
Fonte de S. Tomé	5,8	1,7	1,6	0,6	3	1,8	6,1	12
Fonte do Marrão	6,6	1	2,3	1,1	5	4,4	6,2	15

Campanha de Julho de 2012								
Ponto de amostragem	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)
Fonte Santa	3,6	0,6	1,5	0,1	8	1,8	2,4	12
Fonte da Biquinha	3,9	0,4	1,6	0,1	6	1,1	4,8	10
Mina da Rosa Negra	4,5	0,8	1,1	0,1	6	0,3	6,6	10
Fonte das Penhas da Saúde	2,4	0,3	1,6	0,05	6	1,1	2,9	6,2
Fonte da Saibreira	1,8	0,3	0,3	0	4	0,1	1,2	7,8
Fonte da Nave de Santo António Sul	7,5	1,1	0,9	0	6	0,4	9,5	8,2
Fonte do Espinhaço de Cão	20	0,8	24	3,3	5	0,6	79	21
Fonte do Covão do Boi	2,5	0,2	0,8	0	5	0,6	1,3	12
Mina da Torre	108	1,8	29	1,3	21	10	198	6,1
Fonte dos Perús	1,7	0,4	0,5	0	3	0,6	1,8	4
Nascente da Lagoa Comprida	31	0,5	4,8	0,8	4	1,3	63	6,1
Fonte do Covão do Curral	2,3	0,2	0,8	0	6	0,4	1	7,1
Fonte do Ferreiro	4,5	2	2,1	0,4	1	2,3	4,6	13
Fonte de S. Tomé	5,1	1,3	1,3	0,2	4	2,2	5,8	11
Fonte do Marrão	6,3	0,8	2,1	0,7	7	4,4	6	15

